



TUGAS AKHIR- TM141585

ANALISA KEGAGALAN BAUT DAM RING M30 PADA OK MILL FLSmidth 42-4 DITINJAU DARI ASPEK METALURGI

**REFKI DESPRATAMA M.
NRP. 2111 100 174**

**Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**



FINAL PROJECT- TM141585

M30 BOLT DAM RING FAILURE ANALYSIS ON OK MILL FLSmidth 42-4 OBSERVED FROM METTALURGY ASPECT

REFKI DESPRATAMA M.
NRP. 2111 100 174

Academic Advisor
Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**ANALISA KEGAGALAN BAUT *DAM RING* M30
PADA OK MILL FLSmidth 42-4 DITINJAU DARI
ASPEK METALURGI**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
REFKI DESPRATAMA M
NRP. 2111 100 174

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA (Pembimbing)
NIP. 19501211 198502 1 001
2. Suwarno, ST., MSc. Ph. D. (Penguji I)
NIP. 19800520 200501 1 003
3. Wahyu Wijanarko, ST., MSc. (Penguji II)
NIP. 19820209 201212 1 001
4. Ika Dewi Wijayanti, ST., MSc. (Penguji III)
NIP. 19851202 201404 2 002

**SURABAYA
JANUARI, 2016**

ANALISA KEGAGALAN BAUT DAM RING M30 PADA OK MILL FLSmidth 42-4 DITINJAU DARI ASPEK METALURGI

Nama Mahasiswa : Refki Despratama M.
NRP : 2111100174
Jurusan : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir . Wajan Berata, DEA

Abstrak

Dam ring merupakan komponen penting pada OK Mill FLSmidth 42-4 yang berfungsi untuk mencegah material semen keluar dari grinding table. Dam ring terdiri dari susunan plat yang dikencangkan dengan tiga buah baut. Baut dam ring yang berfungsi untuk mengikat plat dengan table mengalami patahan. Kegagalan tersebut mengharuskan dilakukannya shut down untuk perbaikan. Hal ini menyebabkan kerugian bagi perusahaan.

Dalam penelitian ini dilakukan analisa untuk mencari penyebab serta mengetahui mekanisme terjadinya kegagalan yang ditinjau dari aspek metalurgi. Analisa secara fisik dilakukan melalui pengamatan makro dan mikro. Pengamatan desain dilakukan dengan perhitungan kesesuaian tegangan yang bekerja dengan tegangan ijin dari material baut. Analisa komposisi kimia dan pengujian kekerasan dilakukan baik pada material yang mengalami kegagalan maupun material baut yang baru, sedangkan analisa metalografi hanya dilakukan pada material yang mengalami kegagalan.

Berdasarkan hasil analisa dan data-data yang diperoleh, kegagalan yang terjadi disebabkan oleh fatigue, hal ini didukung dengan adanya beach marks dan striasi pada penampang patahan. Jenis patahan yang terjadi merupakan high cycle fatigue yaitu siklus tegangan yang terjadi lebih dari 10^5 siklus. Kesalahan pemilihan jenis baut dan nilai kekerasan yang tidak sesuai dengan standar merupakan penyebab utama dari kegagalan ini.

Kata Kunci: kegagalan baut, fatigue, beach marks, striasi

M30 BOLT DAM RING FAILURE ANALYSIS ON OK MILL FLSmidth 42-4 OBSERVED FROM METALLURGY ASPECT

Student Name : Refki Despratama M.
Registration Number : 2111100174
Department : Mechanical Engineering
Academic Advisor : Prof. Dr. Ir.Wajan Berata, DEA

Abstract

Dam ring is a crucial component on the OK Mill FLSmidth 42-4 for preventing the cement materials from getting out of the spinning table. Dam ring consists of a composition of plates, enforced with three bolts. The bolt of dam ring which connects the bolt and the table is cracked. That failure caused a shutdown for reparation of the component. The reparation itself costs the company a certain amount of losses.

On this research, a study to find the source of the failure and to find out the mechanism of the failure itself is conducted from a metallurgy point of view. Physical analysis is confined from the metallurgy point of view. The design observation is done with the calculation and a comparative approach of the stress that is currently working on the component with the bolt's permissible maximum stress. Chemical composition analysis and hardness tests are conducted on both the failed parts material and the newly assigned bolt material. The metallography analysis is done only on the failed part.

Based on the data obtained, the failures are caused by fatigued material. The beach marks and striation on the section cut of the fracture. The type of fracture occurred is high cycle fatigue with more than 10^5 stress cycle occurrence. The error in bolt type choice and hardness value that is not qualified according to the standard are the main causes of the failure.

Keywords: *bolt failures, fatigue, beach marks, striation.*

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Analisa Kegagalan Baut Dam Ring M30 Pada OK MILL FLSmidth 42-4 Ditinjau dari Aspek Metalurgi”.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri-ITS. Dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini penulis banyak mendapat bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Kedua Orang tua penulis, Ayah Kiking Mutakin, SE., dan Ibu Neneng Maemunah, SE., yang telah memberikan semangat dan doa untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Wiya Eki Dwiguna dan Aрга Titan Nur Rahman selaku saudara kandung penulis, yang telah memberikan doa, keceriaan dan dukungan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Ika Dewi Wijayanti ST.,MSc., selaku dosen wali dan dosen penguji yang senantiasa memberikan semangat, masukan dan nasehat selama kuliah.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Wajan Berata,DEA, selaku dosen pembimbing yang selalu mengarahkan, memberikan bimbingan, inspirasi, serta dorongan moral hingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan.
5. Bapak Suwarno ST., MSc., Ph.D. dan Bapak Wahyu Wijnarko ST., MSc., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan kepada penulis, sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan sempurna.
6. Bapak Dwi Agus dan Mas Adit selaku pembimbing lapangan di PT. Semen Indonesia yang telah memberikan banyak informasi untuk pengambilan data awal Tugas Akhir ini.

7. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Mesin yang telah banyak memberikan ilmu selama penulis menempuh kuliah.
8. Saudari Astasari atas kasih sayang, semangat, doa dan dukungan moral yang telah diberikan kepada penulis.
9. Karyawan Laboratorium Metalurgi, Pak Mantri, Pak Endang, Pak Budi, Pak Gatot, dan Mas Agus yang telah memberikan bantuan untuk pengujian spesimen.
10. Rekan-rekan di Jurusan Teknik Mesin terutama bidang studi metalurgi Evelyn, Chandra, Galang, Bustan, Sabil, Botik, Iwak, Dono, Alvin, Iqo, Dewi, Opie, Brahmanda, Billy dan semua anggota laboratorium metalurgi atas segala bantuan, keceriaan dan kebahagiaan yang kalian berikan.
11. Kawan-kawan kontrakan klampis semolo tengah 1-F 22 A Fadhil, Satpam, Mbeng, Putra, Dera, Khisni, Johan, Genjik, Nauval, Gafar, Syafri dan Andri.
12. Teman-teman seperjuangan di Universitas Padjajaran Jurusan Biologi, Deri, Yudi, Acep, Dennis, Mia, Gege, Nessa, Ninda, Nana, Nindi dan Nono
13. Teman-teman main wahyu, eka, firman, belok, eirin, dan fisma. Terima kasih atas kebodohan yang telah kalian buat dengan *joke* yang menurut orang tidak lucu, tapi menurut kami itu sempurna. “Pantang pulang sebelum menang”
14. Semua teman-teman Mesin seperjuangan angkatan 2011 [M54] atas persaudaraan yang berkesan.
15. Dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan kebaikan bagi banyak pihak. Semoga kita selalu berada dalam lindungan Allah SWT.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

Lembar Pengesahan	v
Abstrak	vii
Abstract	ix
Kata Pengantar	xi
Daftar Isi	xiii
Daftar Gambar	xv
Daftar Tabel	xix

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA dan DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Dasar Teori	7
2.2.1 Bolt	7
2.2.2 <i>Fatigue Fracture</i>	10
2.2.3 Mekanisme <i>Fatigue Fracture</i>	11
2.2.4 Sambungan Baut	23
2.2.5 <i>Vertical Mill</i>	28

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian	31
3.2 Peralatan	32
3.3 Spesifikasi Baut	33
3.4 Tahap Penelitian	34

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Informasi OK Mill FLSmidth 42-4, baut dan data awal kerusakan	41
4.2 Analisa Kesesuain Diameter Baut dengan Gaya yang Bekerja	45
4.3 Pengamatan Visual dan Makroskopis	55
4.4 Pengamatan Fraktografi	57
4.5 Pengamatan Metalografi.....	61
4.6 Pengamatan Uji Kekerasan	63

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan.....	65
5.2 Saran.....	66

DAFTAR PUSTAKA	67
-----------------------------	----

LAMPIRAN	71
-----------------------	----

BIODATA PENULIS	77
------------------------------	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 OK Mill FLSmidth	2
Gambar 1.2 [A] <i>Susunan grinding roll</i>	3
[B] Pelat <i>dam rim</i> yang belum terpasang	3
[C] Sketsa pelat <i>dam ring</i>	3
[D] Sketsa <i>grinding table</i>	3
[E] Sketsa baut pelat <i>dam ring</i>	3
Gambar 1.3 Baut <i>dam ring</i> yang mengalami kegagalan	4
Gambar 1.4 [A] Tampak atas sampel baut <i>dam ring</i> M30	4
[B] Tampak samping sampel baut <i>dam ring</i> M30	4
Gambar 2.1 Sudut pad ulir ISO	8
Gambar 2.2 Terminologi ulir.....	9
Gambar 2.3 <i>Bolt</i> dengan Gaya <i>Axial</i>	10
Gambar 2.4 <i>Bolt</i> dengan Gaya <i>Shear</i>	10
Gambar 2.5 Notasi untuk beban siklus amplitudo konstan ($R = -1$)	11
Gambar 2.6 Mekanisme patah lelah	11
Gambar 2.7 Grafik ketergantungan <i>fatigue life</i> dengan tingkat tegangannya.....	12
Gambar 2.8 Model Pengintian retak oleh Wood	13
Gambar 2.9 Mekanisme perambatan retak	14
Gambar 2.10 [A] Striasi hasil uji SEM perbesaran 2400x	15
[B] <i>Beach marks</i> yang ditunjukkan oleh anak panah merah.....	15
Gambar 2.11 [A] <i>Dimple</i> pada <i>ductile fracture</i> material <i>copper</i>	16
[B] Retak secara transgranular pada <i>low alloy steel</i>	16

[C] Retak secara <i>intergranular</i> karena <i>carburizing</i>	16
Gambar 2.12 Skema Kegagalan <i>Fatigue</i>	16
Gambar 2.13 Sambungan Baut.....	23
Gambar 2.14 Gaya-gaya yang bekerja pada baut.....	24
Gambar 2.15 <i>Vertical Mill</i>	28
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	32
Gambar 3.2 [A] Baut M30 yang mengalami kegagalan	33
[B] Penampang atas baut M30 yang mengalami kegagalan	33
Gambar 3.3 [A] Kamera nikon D700	36
[B] <i>Stereo microscope</i>	36
Gambar 3.4 <i>Spectrometer Thermo ARL</i>	36
Gambar 3.5 <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	37
Gambar 3.6 Mikroskop Optik Zeiss	38
Gambar 3.7 Alat Uji Kekerasan <i>Rockwell C</i>	38
Gambar 4.1 [A] Baut M30 yang mengalami kegagalan	44
[B] Kegagalan baut terlihat patah pada <i>interface</i> ..	44
[C] Sketsa penampang melintang baut	44
Gambar 4.2 [a] Sketsa gaya-gaya yang bekerja pada baut	45
[b] Gaya penampang muka baut.....	45
[c] Distribusi tegangan geser	45
[d] Distribusi tegangan akibat momen	45
[e] Pengaruh gaya inisial tampak atas dari baut ...	45
Gambar 4.3 Sketsa proses penggilingan material.....	47
Gambar 4.4 Kurva S-N ASTM F568	54
Gambar 4.5 Daerah inisiasi, propagasi dan <i>final fracture</i> pada baut M30	55
Gambar 4.6 Awal retakan pada baut	

yang mengalami kegagalan	55
Gambar 4.7 Pola <i>beach marks</i> pada daerah propagasi.....	56
Gambar 4.8 [A] Skematik permukaan patah <i>fatigue</i> berdasarkan ASM vol.12	56
[B] Penampang patahan baut M30 dari OK mill FLSmidth 42-4	56
Gambar 4.9 Spesimen 1 pengujian <i>Scanning Electrone Microscope</i> (SEM)	58
Gambar 4.10 Hasil SEM spesimen 1 dengan Perbesaran 500x daerah inisiasi	58
Gambar 4.11 Hasil SEM spesimen 1 dengan perbesaran 3000x pada daerah propagasi.....	59
Gambar 4.12 Hasil SEM Spesimen 2 dengan perbesaran 500x	60
Gambar 4.13 [A] Hasil Uji Metalografi pada baut M30 dengan perbesaran 500x	61
Gambar 4.14 Posisi indentasi pada pengujian kekerasan Rockwell C	63
Gambar 4.15 Grafik HRC baut baru vs baut gagal	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jenis profil permukaan patahan yang teridentifikasi dengan <i>fractography</i> pada skala makro.....	17
Tabel 2.2 Jenis profil permukaan patahan yang teridentifikasi dengan <i>fractography</i> pada skala mikro	20
Tabel 3.1 Persentase komposisi kimia baja karbon ASTM F568	34
Tabel 4.1 <i>Data sheet</i> OK Mill FLSmith 42-4.....	41
Tabel 4.2 Perbandingan hasil uji komposisi kimia menggunakan <i>Spectrometer Thermo ARL</i> dengan standar material ASTM F568.....	43
Tabel 4.3 <i>Mechanical properties for bolts, screw and studs ASTM F568</i>	44
Tabel 4.4 Hasil pengujian kekerasan Rockwell	63

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

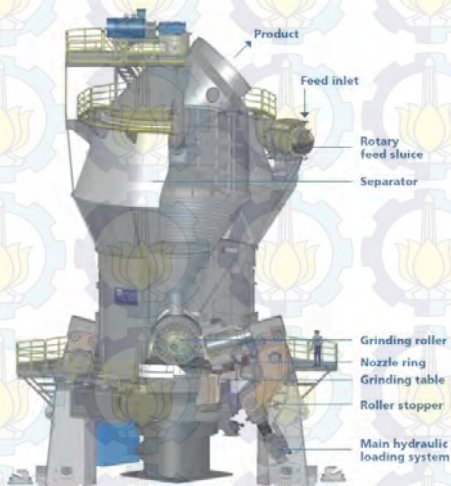
Pengolahan semen dari bahan mentah menjadi produk jadi melewati beberapa tahapan. Tahap penambangan bahan mentah (*quarry*) merupakan tahap awal. Selanjutnya bahan dasar semen yaitu batu kapur, tanah liat, pasir besi dan pasir *silica*. Bahan mentah ini dicampur untuk memperoleh proporsi dan komposisi yang tepat dimulai dengan tahap penggilingan awal. Bahan yang telah berbentuk serbuk tersebut dipanaskan menggunakan *preheater*. Pemanasan lanjutan terjadi didalam kiln sehingga material tersebut membentuk kristal-kristal *clinker*. *Clinker* kemudian dihaluskan lagi didalam *vertical mill* guna menjadi serbuk semen yang halus^[13].

OK Mill FLSmidth 42-4 merupakan salah satu mesin *mill* dengan tipe *vertical mill* pada ranah *finishing mill*. OK Mill FLSmidth 42-4 digunakan karena cenderung lebih hemat energi dibandingkan dengan mesin *mill* tipe *ball mill*. *Finishing mill* merupakan proses akhir dari perjalanan produk semen dengan cara menggiling terak, gipsum dan trass secara bersamaan untuk memperoleh hasil yang homogen. Bahan tersebut bersama-sama digiling diatas *grinding table* yang memiliki 4 buah *grinding roll*. *Grinding roll* yang berfungsi sebagai penekan material memiliki rata-rata *pressure* sebesar 130 *bar*. *Grinding table* memiliki dua belas segmen, masing-masing segmen memiliki 1 buah pelat *dam ring*. *Dam ring* berfungsi untuk mencegah material yang digiling keluar dari *grinding table*. *Dam ring* terdiri dari susunan pelat yang dikencangkan dengan 3 buah baut. Pelat *dam ring* ikut berputar sesuai dengan putaran *grinding table* sebesar 22,2 RPM.

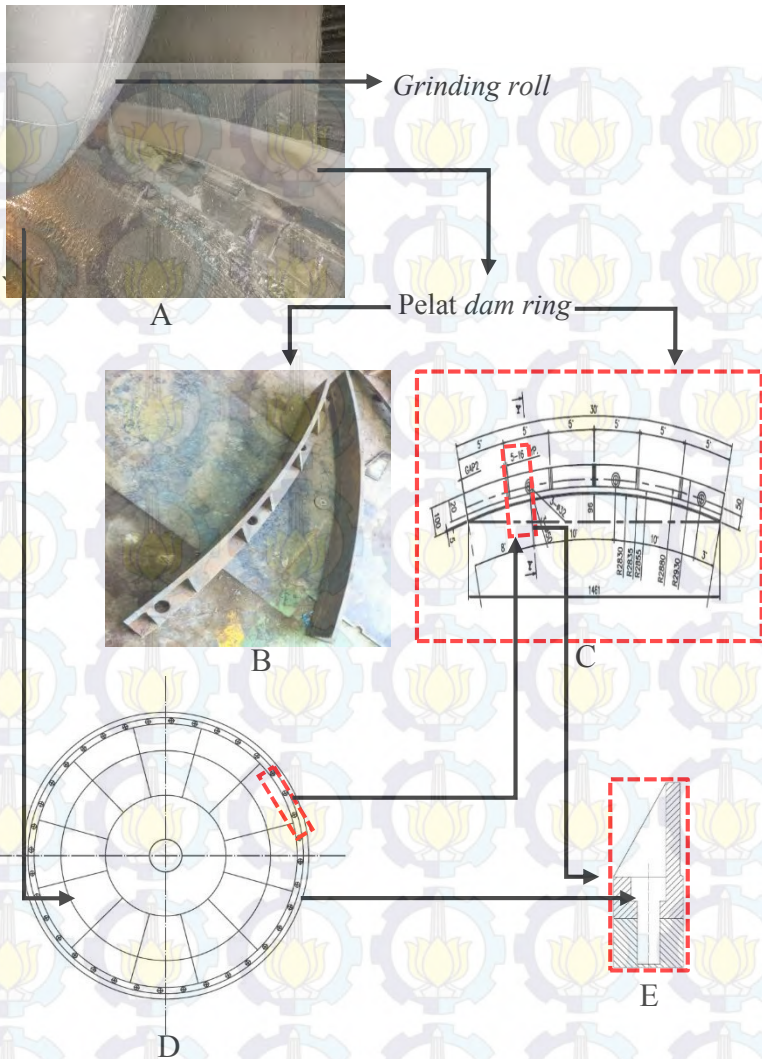
Baut *dam ring* yang berfungsi mengikat antara pelat *dam ring* dan *grinding table* mengalami patahan. Pada awal juli 2015 terdapat 14 buah baut yang mengalami kegagalan dari total 36 baut yang digunakan. Dalam satu tahun terakhir, baut *dam ring* telah

mengalami kegagalan sebanyak 6 kali. Rata-rata kegagalan terjadi setiap 2-3 bulan, hal ini berlangsung secara terus menerus.

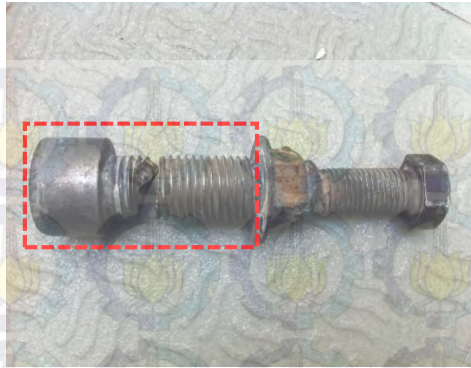
Kerusakan pada komponen ini memberikan dampak negatif yang cukup besar pada proses produksi semen. Terganggunya proses produksi akibat perbaikan komponen yang rusak dan membengkaknya biaya operasional adalah beberapa contoh dampak negatif yang terjadi.



Gambar 1.1 OK Mill FLSmidth ^[13]



Gambar 1.2 [A] Susunan grinding roll, pelat dam ring dan grinding table [B] pelat dam ring yang belum terpasang [C] sketsa pelat dam ring [D] sketsa grinding table [E] sketsa baut pelat dam ring



Gambar 1.3 Baut *dam ring* yang mengalami kegagalan



A



B

Gambar 1.4 [A] Tampak atas sampel baut *dam ring* M30 [B] tampak samping sampel baut *dam ring* M30

Informasi dari kasus kegagalan yang terjadi akan dikumpulkan, selanjutnya dilakukan penelitian tentang analisis kegagalan pada baut *dam ring* tersebut secara sistematis. Komparasi antara hasil fotografi, metalografi, fraktografi, identifikasi komposisi kimia, pengujian mekanik dan analisa pembebanan akan digunakan sebagai dasar penelitian ini sebagai langkah antisipasi untuk meminimalisir terjadinya kasus kegagalan dengan jenis serupa.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dikaji dalam analisa kegagalan baut *dam ring* M30 pada OK Mill FLSmidth 42-4, yaitu:

1. Bagaimana mekanisme terjadinya kegagalan baut *dam ring* M30 pada OK Mill FLSmidth 42-4 ditinjau dari aspek metalurgi.
2. Bagaimana pola patahan, sifat mekanik dan komposisi kimia yang terjadi akibat kondisi pengoperasian.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui mekanisme terjadinya kegagalan baut *dam ring* M30 pada OK Mill FLSmidth 42-4 ditinjau dari aspek metalurgi.
2. Mengetahui pola patahan, sifat mekanik dan komposisi kimia yang terjadi akibat kondisi pengoperasian.

1.4 Batasan Masalah

Ada beberapa faktor yang tidak terkontrol yang dapat mempengaruhi pengambilan data dan analisa, maka perlu diberikan batasan terhadap permasalahan diatas, antara lain:

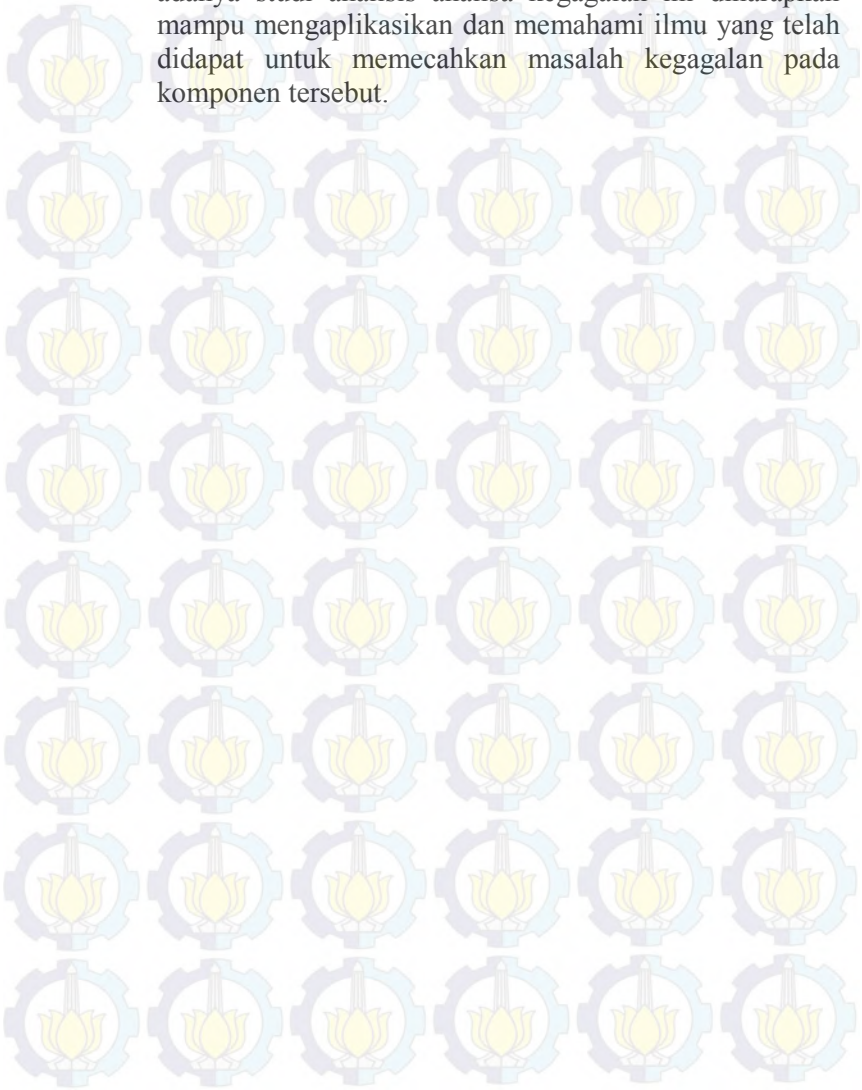
1. Desain kepala baut tidak mempengaruhi kerusakan.
2. Temperatur dianggap konstan dan tidak mempengaruhi kerusakan

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi dunia ilmu pengetahuan, yaitu:

- Bagi dunia industri yang menggunakan *dam ring* pada komponen yang berputar, dengan adanya analisa kegagalan ini diharapkan dapat dijadikan acuan atau pertimbangan dalam pencegahan dan perawatan untuk menghindari kerusakan yang serupa.

- Bagi kalangan akademis terutama mahasiswa, dengan adanya studi analisis analisa kegagalan ini diharapkan mampu mengaplikasikan dan memahami ilmu yang telah didapat untuk memecahkan masalah kegagalan pada komponen tersebut.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Alex Hudgins pada tahun 2014 tentang *fatigue of threaded fasteners*, proses analisa dilakukan pertama kali adalah dengan melihat pola patahan makroskopis yang tampak pada permukaan. Pada baut baja-*molybdenum* tersebut terlihat pola patahan datar (*flat*) dan *beach marks*, yang menunjukkan bahwa kegagalan terjadi dikarenakan *fatigue*. Setelah diamati secara mikroskopis oleh *Scanning Electron Microscope* (SEM) terlihat *dimples* beserta perkiraan *fatigue crack initiation* dan daerah *final fracture*. Baut mengalami kegagalan dikarenakan *embrittlement*, ditunjukkan oleh terdapatnya patahan yang lurus pada uji SEM ^[1].

Pada penelitian yang dilakukan oleh Ihram Hatta tentang analisis kerusakan baut pengikat meja putar pada sistem transportasi alat angkat menunjukkan bahwa proses analisa dilakukan pertama kali adalah dengan melihat pola patahan makroskopis yang tampak pada permukaan. Berdasarkan ciri-ciri pola patahan berupa *striasi* dan *beach marks* didapatkan kesimpulan pola patahan ialah *fatigue*. Terdapat cacat berupa *laps* (lipatan) pada baut pada permukaan ulir akibat kesalahan proses manufaktur ^[2].

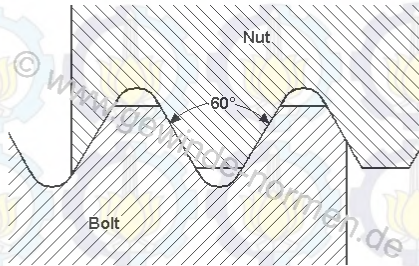
2.2 Dasar Teori

2.2.1 Bolt

Bolt merupakan elemen mesin dengan alur heliks pada permukaan yang berfungsi untuk mengikat dua atau lebih komponen (*fastener*) yang bersifat *nonpermanent*, artinya, *fastener* ini dapat dibongkar pasang untuk melepas elemen-elemen mesin yang digabungkan. *Bolt* dapat dikencangkan dan dilepas dengan

memberikan torsi pada *bolt head* atau pada *nut*. Berdasarkan bentuk ulirnya, secara umum *bolt* dapat diklasifikasikan menjadi^[3]:

- Ulir ISO (*metric*)
Memiliki sudut antar *root* dan *crest* sebesar 60° seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Sudut pada ulir ISO^[3]

- Ulir UN (*United Series*)
- Ulir *Whitworth*
- Ulir *Trapezoidal*
- Ulir *Knuckle*
- Ulir *Buttress*

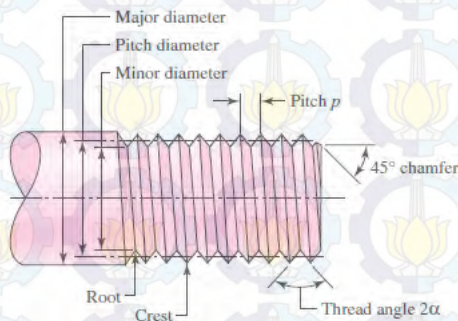
Perbedaan utama dari masing-masing bentuk ulir adalah sudut antara puncak (*crest*) atau lembah (*root*) dengan puncak atau lembah terdekat. Bentuk runcing (V) pada *crest* dan *root* menyebabkan ulir sangat rentan terhadap kerusakan karena adanya konsentrasi tegangan. Oleh karena itu, ujung *crest* dan dasar *root* dibuat rata atau lengkung pada proses *forming*.

Bolt memiliki terminologi yang sering disebut seperti pada gambar 2.2:

- *Pitch* : jumlah ulir dalam satu satuan panjang (mm atau inch).
- *Crest* : jarak terjauh ulir dari sumbu pusatnya.

- *Root* : jarak terdekat ulir dari sumbu pusatnya. Pada ulir ISO dan UN, sudut pada *root* dan *crest* sebesar 60° .
- *Major diameter* : diameter terbesar dari ulir yang diukur dari puncak (*crest*) ke puncak.
- *Minor diameter* d_r : diameter terkecil dari ulir yang diukur dari pangkal (*root*) ke pangkal.
- *Pitch diameter* d_p : diameter teoritis yang terletak antara *major* dan *minor diameter*.
- *Lead* : jarak pergerakan ulir yang sejajar dengan sumbu saat *bolt* diputar satu putaran. Pada *single lead*, *lead* dan *pitch* nilainya sama, sedangkan pada *double-threaded bolt*, nilai *lead* dua kali nilai *pitch*, dan seterusnya.

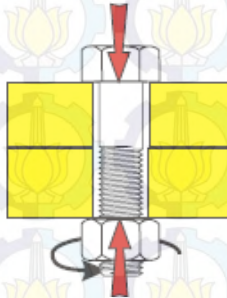
Semua ulir dibuat dengan aturan tangan kanan (*right-hand rule*) dengan beberapa pengecualian sehingga *bolt* mengalami pengencangan saat diputar searah jarum jam, dan sebaliknya.



Gambar 2.2 Terminologi ulir^[4]

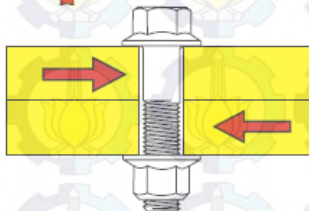
Berdasarkan hubungan antara arah gaya dengan luas area yang mengalami gaya, pembebanan yang diterima dapat dibagi menjadi:

- Tegangan axial (*axial*): tegangan yang dihasilkan oleh gaya yang arahnya tegak lurus terhadap luasan penampang melintang *bolt* seperti gambar 2.3.



Gambar 2.3 Bolt dengan Gaya Axial^[5]

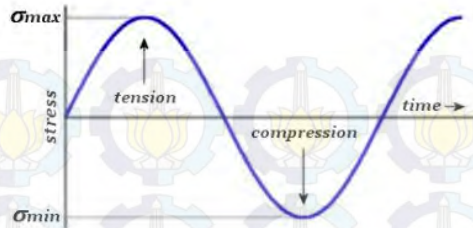
- Tegangan geser (*shear*): tegangan yang dihasilkan oleh gaya yang arahnya sejajar terhadap luasan penampang melintang *bolt* seperti pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Bolt dengan Gaya Shear^[5]

2.2.2 Fatigue Fracture

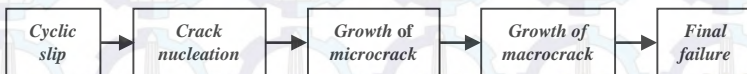
Kelelahan (*fatigue*) adalah suatu kerusakan yang lokal, progresif, dan permanen pada material karena mendapat beban siklik yang besarnya jauh di bawah beban *yield* material tersebut. Beban siklik akan menghasilkan tegangan tarik dan regangan plastis yang terjadi secara terus menerus, hingga akhirnya menghasilkan *crack*. Contoh grafik beban siklik ditunjukkan pada gambar 2.5.



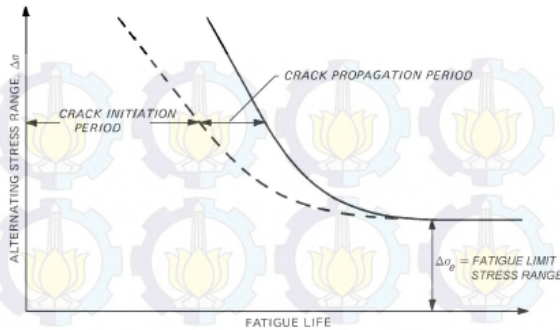
Gambar 2.5 Notasi untuk beban siklus amplitudo konstan ($R = -1$)
[6]

2.2.3 Mekanisme *Fatigue Fracture*

Fatigue fracture terjadi melalui tiga tahapan, yaitu tahap retak awal (*crack initiation*), tahap penjaralan retak (*crack propagation*), dan tahap patah statis. Setelah *fatigue crack* merambat cukup panjang, penampang material akan berkurang sehingga beban hanya ditanggung oleh penampang tersisa yang belum retak. Penampang yang tersisa tidak mampu menahan beban yang diberikan sehingga material patah (tahap *final failure* atau patah statis) seperti yang terlihat pada gambar. 2.6 dan 2.7.



Gambar 2.6 Mekanisme patah lelah [6]



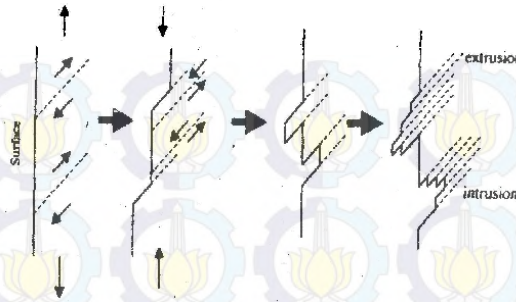
Gambar 2.7 Grafik ketergantungan umur lelah (*fatigue life*) dengan tingkat tegangannya [7]

Menurut Schijve, ada 5 fase yang terjadi selama proses *fatigue*, yaitu:

1. *Cyclic slip*
2. *Crack nucleation*
3. *Growth of microcrack*
4. *Growth of macrocrack*
5. *Final failure*

Tahap Retak Awal (*Crack Initiation*)

Awal retak biasanya dimulai dari permukaan karena permukaan menerima beban terbesar dan memiliki kemungkinan terbesar untuk adanya konsentrasi tegangan. Konsentrasi tegangan juga dapat diakibatkan oleh cacat pada material. Model *crack initiation* oleh Wood ini dapat dilihat pada gambar 2.8.



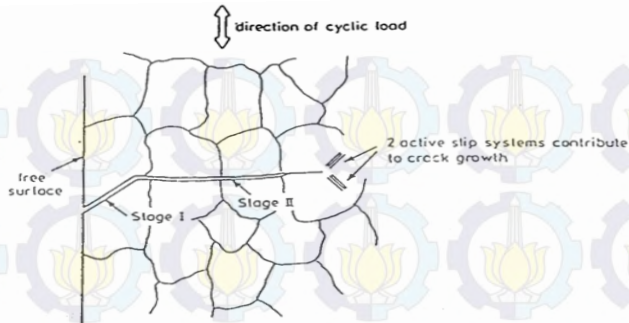
Gambar 2.8 Model pengintian retak oleh Wood [8]

Saat material mendapat beban tarik untuk pertama kalinya, slip membentuk permukaan bertingkat dengan sudut 45° terhadap sumbu tegangan akibat tegangan geser maksimal yang terjadi pada sudut tersebut. Pembebanan selanjutnya menyebabkan slip pada arah yang berlawanan. Slip terjadi pada bidang yang berdekatan dengan yang pertama, dan selanjutnya diulangi dengan pembebanan siklus yang sama. Tahap retak awal ini meliputi fase *cyclic slip*, fase pembentukan inti retak (*crack nucleation*) dan pertumbuhan retak mikro (*growth of microcrack*).

Tahap Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

Perambatan retak pada suatu material terjadi jika terdapat konsentrasi tegangan yang menyebabkan adanya tegangan yang melebihi kekuatan material yang pada bagian yang retak. Awal retakan mula-mula akan menjalar pada bidang slip di dalam beberapa butir dengan kecepatan yang sangat lambat dan tidak dapat diamati secara makro. Peristiwa ini disebut perambatan retak tahap I.

Pertumbuhan retak tahap II sering ditandai dengan adanya striasi. Pada tahap ini pertumbuhan retak tegak lurus dengan tegangan tarik maksimum, dan disebut dengan retak makro. Mekanisme perambatan retak dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Mekanisme perambatan retak ^[6]

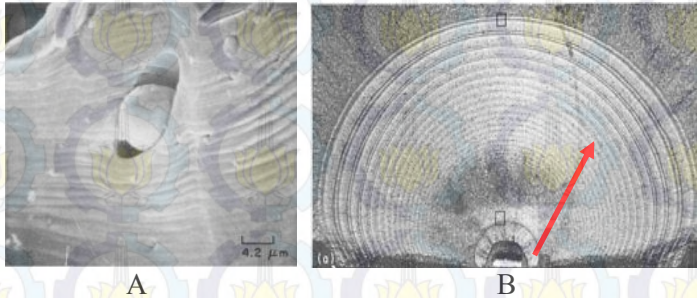
Tahap Patah Akhir

Retak makro bertambah panjang pada setiap siklus pembebanan sehingga menyebabkan luas penampang material berkurang. Penampang material yang semakin kecil tidak lagi mampu menanggung beban yang diterima, sehingga akhirnya patah.

Pada logam, perbedaan proses patah dapat dilihat dari profil permukaan patahan yang dapat diobservasi baik secara makro melalui *stereomicroscope* ataupun secara mikro dengan *fractography*. Klasifikasi dasar dari proses patah bila ditinjau dari modus dan penyebabnya adalah patah ulet (*ductile fracture*), patah getas (*brittle fracture*), patah lelah (*fatigue fracture*), dan patah merangkak (*creep fracture*). Masing-masing dari jenis patahan diatas memiliki karakteristik tersendiri, dan ditunjukkan pada tabel 2.1 dan 2.2.

Perbedaan antara *fatigue fracture* dan *creep fracture* ditandai dengan adanya *beach marks* dan striasi. *Fatigue fracture* memiliki *beach marks* dan striasi, sedangkan pada *creep fracture* parameter tersebut tidak terlihat. *Beach marks* bisa diketahui melalui pengamatan makro menggunakan *stereomicroscope*, sedangkan striasi hanya bisa diamati dengan *fractography*. Bentuk *beach marks* striasi merupakan hasil dari fluktuasi pembebanan

yang diberikan pada benda. *Beachmark* dan striasi dapat dilihat pada gambar 2.10

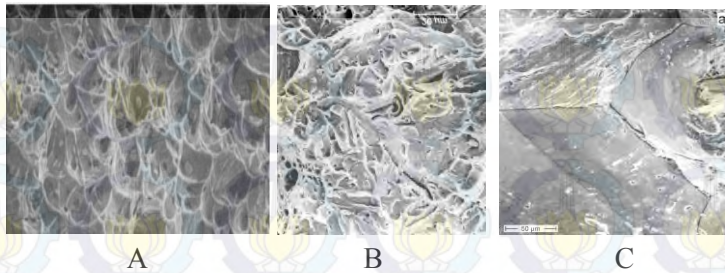


Gambar 2.10 [A] Striasi hasil uji SEM perbesaran 2400x [B] *beach marks* yang ditunjukkan oleh anak panah merah ^[9]

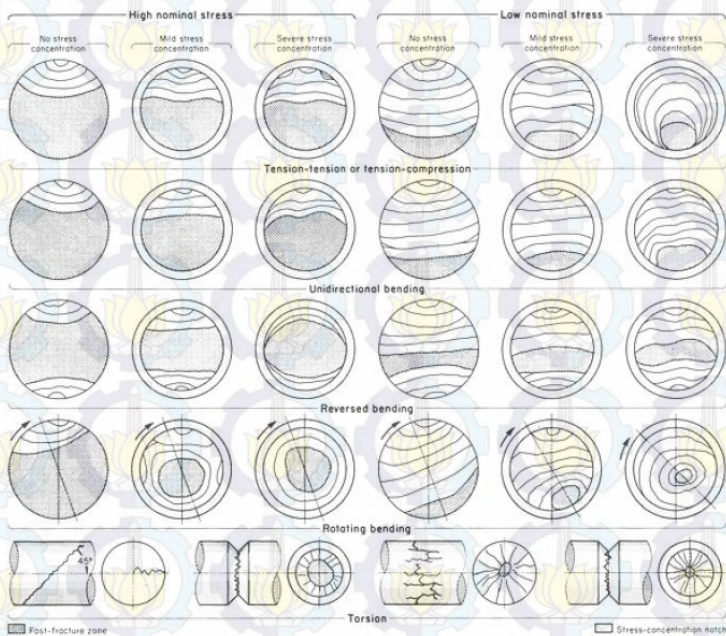
Perbedaan *ductile* dan *brittle fracture* dapat diamati secara makro dari permukaan patahan. *Ductile fracture* memiliki perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*. *Brittle fracture* memiliki permukaan patahan yang datar dan tegak lurus terhadap arah beban, tanpa adanya petunjuk bahwa telah terjadi deformasi plastis sebelum benda mengalami patah. Selain kedua karakteristik diatas, terdapat pola patahan gabungan (*mix-mode appearance*) dari *brittle fracture* yang bertransformasi jadi *ductile* atau sebaliknya.

Pada skala mikro, *ductile fracture* ditandai dengan adanya profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh penjarangan retakan mikro (*microvoids coalescence*). Sedangkan *brittle fracture* ditandai dengan salah satu dari fenomena berikut seperti gambar 2.11:

- Patahan melintasi butiran atau patah transgranular, dikenal dengan nama *cleavage*.
- Patahan menyusuri batas butir atau patah intergranular, dikenal dengan nama *intergranular embrittlement*.



Gambar 2.11 [A] *Dimple* pada *ductile fracture* material copper ^[9], [B] retak secara *transgranular* pada *low alloy steel* yang mengalami pengerasan, [C] retak secara *intergranular* karena *carburizing* ^[10]



Gambar 2.12 Skema Kegagalan *Fatigue* ^[6]

Tabel 2.1 Jenis profil permukaan patahan yang teridentifikasi dengan *fractography* pada skala makro^[11]

Tanda/Indikasi	Implikasi
Distorsi terlihat dengan jelas	Deformasi plastik yang telah melewati kekuatan mulur dari material, kemungkinan juga terjadi <i>instability</i> (<i>necking</i> ataupun <i>buckling</i>) serta kerusakan pasca kegagalan.
Bekas patahan (<i>notch</i>) terlihat dengan jelas	Kemungkinan sebagai lokasi awal retakan. (<i>crack initiation</i>)
Orientasi permukaan patahan relatif terhadap geometri dari komponen dan arah pembebanan	<ul style="list-style-type: none"> • Mengetahui jenis kondisi pembebanan (Model 1, Model 2, Model 3). • Identifikasi pola patahan pada skala makro.
Terdapat dua profil permukaan yaitu datar dan bergelombang pada patahan.	<ul style="list-style-type: none"> • Arah perambatan retakan sejajar dengan arah <i>shear lips</i>. • Modus Patahan Gabungan (<i>mix-mode fracture</i>).
Terdapat ujung retakan yang tajam pada permukaan patah.	<ul style="list-style-type: none"> • Kemungkinan beban adalah beban siklik. • Kemungkinan adanya pemrosesan yang tidak sempurna seperti <i>shot peening</i> dan <i>quench crack</i>.
Pola garis-garis radial dan chevron (patahan berbentuk huruf v)	<ul style="list-style-type: none"> • Menunjuk ke arah lokasi awal retakan. • Menunjukkan arah perambatan retakan.

Patahan yang dikelilingi garis, pembebanan <i>motonic</i> (patahan berbentuk huruf u)	<ul style="list-style-type: none"> • Garis menunjukkan arah perambatan retakan. • Menunjukkan ketidaklengkapan proses pengerjaan material.
Patahan yang dikelilingi garis, pembebanan siklik (<i>beach marks</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Menunjukkan pembebanan siklik. • Menjalar dari tengah radius kelengkungan
Ratchet Marks	<ul style="list-style-type: none"> • Bukti yang kuat untuk menunjukkan model pembebanan siklik • Menunjukkan awalan retakan
Dua daerah permukaan yang berdekatan menunjukkan warna yang berbeda, salah satu daerah seperti memudar	<ul style="list-style-type: none"> • Kemungkinan terjadinya korosi. • Kemungkinan terdapat perubahan temperatur.
Bagian yang mengalami oksidasi	<ul style="list-style-type: none"> • Kemungkinan sebagai awal retakan.
Pantulan cahaya dari permukaan	<ul style="list-style-type: none"> • Gelap : patah ulet atau menerima beban siklik • Mengkilap : patah getas • Bergelombang dan mengkilap : patah intergranular yang terjadi pada ukuran butir yang besar.
Goresan akibat rolling	<ul style="list-style-type: none"> • Ketika membentuk semacam belitan berarti gaya yang diberikan adalah gaya torsi

Bekas proses <i>machining</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Bila gaya torsi yang diberikan, maka bekas tersebut tidak membelok (membengkok).
Kekasaran permukaan	<ul style="list-style-type: none"> • Bila kekasaran meningkat sesuai dengan arah perambatan retakan, hal ini disebabkan oleh adanya momen bending dari daerah yang mendapat tegangan kompresif kemudian retakan berpindah ke daerah ini. • Bila terdapat daerah permukaan yang halus dan kasar sesuai dengan arah perambatan retak, maka bisa diprediksi bahwa material/komponen menerima beban siklik dan mengalami transformasi dari patah ulet ke getas ataupun sebaliknya. • Bila tingkat kekasaran permukaan cukup tinggi disertai warna permukaan yang gelap, maka patahan termasuk ke dalam patah ulet.
Adanya gerusan (secara <i>general</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Menunjukkan adanya vibrasi • Menunjukkan akhir dari separasi • Bila gerusan membentuk semacam pusaran/olakan, maka mengindikasikan adanya gaya torsi.
Adanya gerusan (pada lokasi tertentu)	<ul style="list-style-type: none"> • Mengindikasikan <i>crack closure</i> dari pembebanan siklik. • Bisa dikatakan sebagai model pengganti dari <i>beach marks</i>

Tabel 2.2 Jenis profil permukaan patahan yang teridentifikasi dengan *fractography* pada skala mikro^[11]

Tanda/Indikasi	Implikasi
Permukaan patah yang menunjukkan adanya bentuk lesung (<i>dimpled fracture surface</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Patah ulet dikarenakan <i>overload</i>
Permukaan patah yang kompleks (<i>faceted fracture surface</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Pola patah getas • Kemungkinan adanya SCC (<i>Stress Corrosion Cracking</i>) • Kemungkinan ΔK <i>Fatigue</i> (rentang faktor intensitas tegangan lelah) yang rendah.
Intergranular dengan batas butir yang halus/tipis	<ul style="list-style-type: none"> • Kemungkinan proses perlakuan panas yang tidak sempurna ataupun kondisi operasi yang mendorong terjadinya patah (temperatur tinggi, lingkungan yang korosif) • Kemungkinan ΔK <i>Fatigue</i> (rentang faktor intensitas tegangan lelah) yang rendah.
Intergranular dengan batas butir berbentuk <i>dimple</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Patahan dikarenakan temperatur <i>melting</i> yang terlalu tinggi – <i>decohesive rupture</i>.

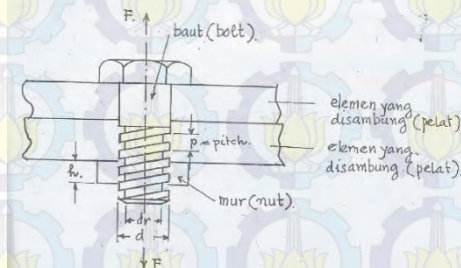
	<ul style="list-style-type: none"> • Kemungkinan proses perlakuan panas sehingga terbentuk daerah kosong disekitar batas butir.
Bentuk seperti aliran sungai (<i>river pattern</i>) dan bentuk seperti <i>fan</i> (<i>fan pattern</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Patah getas (<i>cleavage fracture</i>)
Bentuk patahan menyerupai lidah (<i>tongues shape</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Deformasi melalui mekanisme <i>twinning</i> pada saat perambatan retak cepat
Alur pada permukaan patahan transgranular	<ul style="list-style-type: none"> • Mengindikasikan lingkungan yang korosif, dan pola patah ulet. • Retakan merambat sejajar dengan arah alur.
Goresan-goresan halus (Striasi)	<ul style="list-style-type: none"> • Menunjukkan adanya beban siklik, bila spasi striasi berukuran sama maka amplitudo tegangannya konstan, bila spasi striasinya berubah-ubah maka amplitudo tegangannya bervariasi. • Striasi juga dapat disebabkan oleh pembentukan fasa

	kedua pada struktur mikro
Alur	<ul style="list-style-type: none"> • Kemungkinan <i>Stress Corrosion Cracking</i>.
Artefak-Patahan menyerupai bentuk lumpur (<i>mud cracks</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Adanya pengeringan cairan di permukaan benda. Mengindikasikan adanya proses pembersihan yang tidak baik. Namun bila terjadi pada saat komponen baru diterima, fenomena ini menandakan adanya SCC, dan material perlu diperiksa.
Artefak-Patahan menyerupai jejak ban (<i>tire tracks</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Menunjukkan jenis pembebanan siklik. • Dikarenakan adanya sejumlah unsur yang terperangkap.

2.2.4 Sambungan Baut

Analisa Tegangan pada Baut dan Mur

Gambar 2.13 menunjukkan dua elemen yang disambung dengan menggunakan baut dan mur. Jika pada konstruksi sambungan tersebut menyebabkan terjadi beban F pada baut dan murnya, maka analisa tegangan pada baut dan mur dilakukan dengan menggunakan persamaan umum sebagai berikut.



Gambar 2.13 Sambungan Baut^[12]

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Dimana :

σ = Tegangan normal yang timbul

A = Luas penampang melintang yang didasari pada diameter kaki ulir

Ulir pada baut akan mengalami tegangan geser dan tegangan kompresi (*bearing stress*)

- Pada ulir baut : $\tau_b = \frac{F}{\pi \cdot d_r \cdot (h/2)}$
- Pada ulir mur : $\tau_n = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot (h/2)}$
- Pada kedua ulir : $\sigma_b = \frac{F}{(\pi/4) \cdot (d^2 - d_r^2) \cdot (h/p)}$

Perhitungan diatas menggunakan asumsi tiap ulir menerima beban distribusi yang sama

Dimana :

τ_b = Tegangan geser pada ulir baut di daerah kaki ulir baut.

τ_n = Tegangan geser pada ulir mur di daerah kaki ulir mur

d_r = Diameter kaki ulir baut

d = Diameter kaki ulir mur

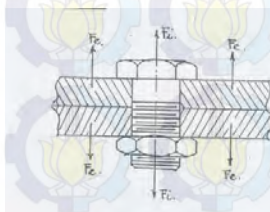
h = Tinggi atau tebal mur

σ_b = Tegangan bearing (kompresi) pada ulir baut dan mur

p = *Pitch*

Pengaruh Beban Awal

Gambar 2.14 menunjukkan beban awal F_i timbul karena diberikan torsi T saat mengencangkan baut dan mur. Jadi beban awal ini dapat dihitung dari hubungan F_i dan T sebagai berikut :



Gambar 2.14 Gaya-gaya yang bekerja pada Baut ^[12]

$$T = c . d . F_i$$

Dimana :

d = diameter nominal baut

c = koefisien torsi yang berhubungan dengan gesekan

Koefisien c dapat dihitung dari :

$$c = \frac{d_m}{2d} \left(\frac{\mu_t \cdot \sec \phi + \tan \psi}{1 - \mu_t \cdot \sec \phi \cdot \tan \psi} \right) + \mu_c \cdot \frac{d_c}{2d}$$

Dimana :

d_m = diameter rata-rata = $\frac{d+dr}{2}$ (in)

d = diameter nominal baut (in)

d_c = diameter rata-rata bidang geser / kompresi pada mur (in)

μ_t = koefisien gesek ulir baut

μ_c = koefisien gesek permukaan kompresi pada baut atau mur

ϕ = setengah sudut ulir (deg)

ψ = sudut heliks ulir (deg)

Koefisien torsi ini secara eksperimental mempunyai harga-harga :

c = 0.2 (tanpa pelumasan)

c = 0.15 (dengan pelumasan)

Pengaruh beban statis

Setelah dikencangkan kemudian konstruksi sambungan menerima beban eksternal F_e , maka beban ini terbagi baut dan pelat dengan porsi masing-masingnya didapat sebagai berikut :

- Total beban diterima baut :

$$F_b = F_{eb} + F_i \quad \text{atau} \quad F_b = \frac{k_b}{k_b + k_p} F_e + F_i$$

- Total beban yang diterima pelat :

$$F_p = F_{ep} - F_i \quad \text{atau} \quad F_p = \frac{k_p}{k_b + k_p} F_e - F_i$$

Dimana :

K_b = Konstanta kekakuan (“*Stiffness Constant*”) bahan baut
(lb/in)

$$= \frac{A_b \cdot E_b}{\ell_b}$$

K_p = Konstanta kekakuan bahan pelat (lb/in)

$$= \frac{A_p \cdot E_p}{\ell_p}$$

A_b = Luas penampang baut $= \frac{\pi}{4} \cdot d_p^2$,

A_p = Luas penampang pelat $= \frac{\pi}{4} [(3d)^2 - (db)^2]$ (in)

E_b = Modulus elastisitas bahan baut (psi)

E_p = Modulus elastisitas bahan pelat (psi)

ℓ_b = Panjang baut, umumnya sama dengan ℓ_p

F_e = $F_{eb} + F_{ep}$

d_p = diametern nominal pelat

db = diameter nominal baut

Pengaruh beban siklik

Jika beban luar F_e , berfluktuasi dari $F_{e(min)}$ sampai $F_{e(max)}$ maka beban yang diterima baut juga akan berfluktuasi, jadi persamaan diatas dikembangkan menjadi :

$$F_{b(max)} = \frac{k_b}{k_b + k_p} F_{e(max)} + F_i$$

$$F_{b(min)} = \frac{k_b}{k_b + k_p} F_{e(min)} + F_i$$

$$F_{b(avg)} = \frac{F_{b(max)} + F_{b(min)}}{2} = \frac{k_b}{k_b + k_p} F_{e(avg)} + F_i$$

$$F_{b(ampl)} = \frac{F_{b(max)} - F_{b(min)}}{2} = \frac{k_b}{k_b + k_p} F_{e(ampl)} \quad [14]$$

Fluctuating and Shock Load Theory

Teori fluktuasi berdasarkan adanya beban kejut dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut.

$$\frac{S_{yp}}{N} \geq \sqrt{K_{sb} \left(\sigma_{avg} + \frac{S_{yp}}{S_e} \sigma_r \right)^2 + 3K_{st} \left(\tau_{avg} + \frac{S_{syp}}{S_{es}} \tau_r \right)^2} \quad [14]$$

Dimana:

S_{yp} adalah stress yield point (MPa)

S_{syp} adalah shear stress yield point (MPa)

N adalah angka keamanan

K_{sb} adalah shock factor for bending, tension or compression

K_{st} adalah shock factor for torsion

σ_{avg} adalah tegangan principal rata – rata (MPa)

σ_r adalah range tegangan principal (MPa)

τ_{avg} adalah tegangan geser rata – rata (MPa)

τ_r adalah range tegangan geser (MPa)

S_e adalah corrected endurance limit (MPa)

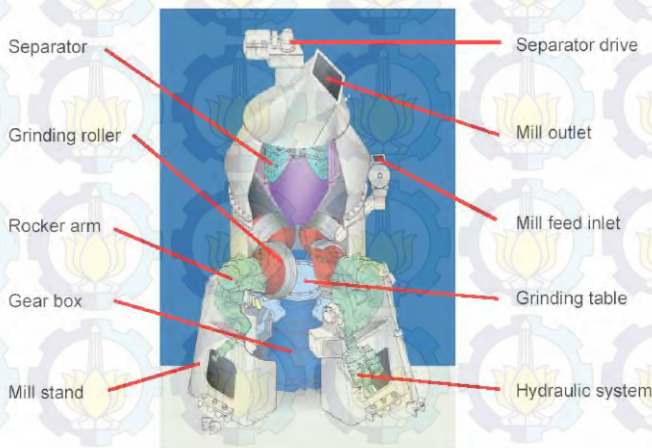
S_{es} adalah corrected endurance limit for shear (MPa)

2.2.5 Vertical Mill

Vertical Mill adalah sebuah alat yang berfungsi untuk menggiling material. Pada pabrik Tuban 1 proses penggilingan akhir menggunakan *vertical mill* dengan merk dagang OK mill FLSmidth 42-4. *Finish mill* adalah sebuah proses menggiling bersama antara terak dengan 3% - 5% gipsium natural atau sintetis (untuk pengendalian setting dinamakan *retarder*) dan beberapa jenis aditif (*pozzolan*, *slag*, dan batu kapur) yang ditambahkan dalam jumlah tertentu, selama memenuhi kualitas dan spesifikasi semen yang dipersyaratkan.

Akhir-akhir ini proses penggilingan semen semakin canggih seiring banyaknya desakan dari dunia untuk mengefisienkan proses penggilingan semen yang terkenal haus akan kebutuhan *power* listrik. Salah satu kemajuan yang dicapai adalah penggunaan *vertical mill* sebagai alat penggilingan semen. Banyak keuntungan yang didapat dari penggunaan peralatan *vertical mill* tersebut, diantaranya:

1. Hemat pemakaian listrik
2. Hemat pemakaian ruang/space
3. Hemat pemakaian peralatan transport



Gambar 2.15 *Vertical mill* ^[13]

Grinding Table

Grinding table merupakan meja penggilingan material semen memiliki diameter 5600 mm dan kecepatan 22,2 RPM. *Grinding table* terbuat dari *ductile iron*, terdapat 12 segmen. *Grinding table* memiliki berat 19,6 ton. Bagian paling luar *grinding table* terdapat pelat *dam ring* yang diikat oleh 3 buah baut. Setiap segmen memiliki 1 buah *dam ring*. *Dam ring* berfungsi menjaga material kasar agar tidak langsung jatuh ke *rejector*, sehingga masih ada kesempatan material untuk digiling. ^[13]

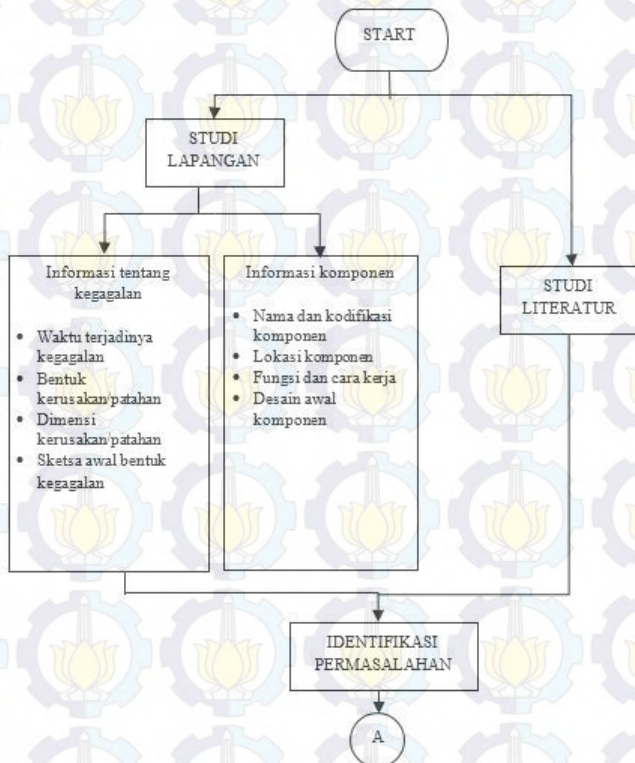


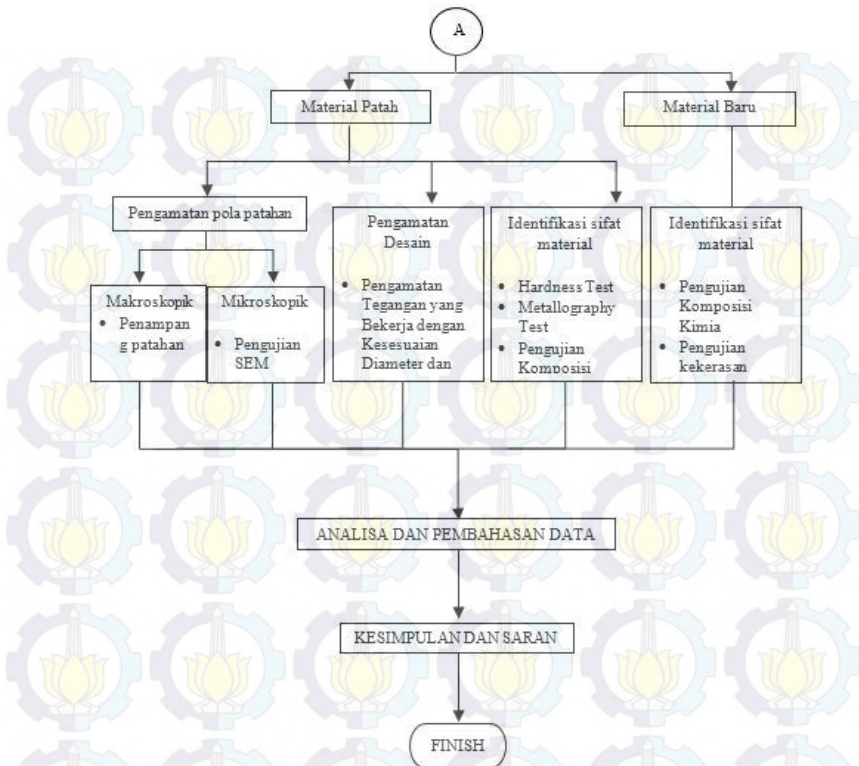
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan untuk mencapai tujuan dari penelitian adalah sebagai berikut:





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan untuk melakukan penelitian analisa kegagalan, antara lain:

1. Penggaris dan jangka sorong
2. Kamera Nikon D700
3. Alat pemotong: Marumoto *cut-off* MNO 012
4. Mikroskop Optis
5. Perangkat *grinding*, *polishing*, dan *etching*

6. Alat uji komposisi kimia *spectrometer Thermo ARL*
7. Alat uji kekerasan *Rockwell C*
8. Mesin *Scanning Electron Microscope (SEM)*

3.3 Spesifikasi Baut

Sampel material diambil dari baut pengikat *dam ring* pada OK mill FLSmidth 42-4 yang mengalami kegagalan pada Juli 2015 ialah baut M30 dengan diameter 30 mm dan terbuat dari *carbon steel grade 8.8* ekuivalen dengan ASTM F568. Kegagalan terjadi pada baut pengikat *dam ring*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 [A] Baut M30 yang mengalami kegagalan [B] penampang atas baut M30 yang mengalami kegagalan

Tabel 3.1 Persentase komposisi kimia baja karbon ASTM F568

Property Class	Nominal Product Diameter	Material and Treatment	Product Analysis Element (% by weight)					
			C		Mn	B	P	S
			Min	Max	Min	Min	Max	Max
8.8	M16-M72	Medium Carbon martensite steel (quenched and tempered)	0,25	0,55	0,74	0,0005	0,048	0,058

3.4 Tahapan Penelitian

Pada Tugas Akhir ini dilakukan beberapa langkah-langkah penelitian analisa kegagalan sebagai berikut :

Pengamatan Lapangan

Proses pengamatan lapangan dilakukan di PT. Semen Indonesia dengan tujuan menganalisis permasalahan yang terjadi pada komponen produksi semen kemudian merumuskannya ke dalam sebuah penelitian secara lengkap dan menyeluruh.

Identifikasi Permasalahan

Setelah dilakukan pengamatan lapangan, diperoleh suatu identifikasi permasalahan, yaitu kegagalan baut M30 pengikat *dam ring* pada OK mill FLSmidth 42-4.

Perumusan Masalah dan Tujuan

Setelah dilakukan tahap diatas, kerusakan tersebut kemudian dirumuskan menjadi suatu permasalahan. Perumusan masalah ini disertai dengan penetapan batasan masalah untuk memperjelas ruang lingkup penelitian serta penetapan tujuan dari penelitian tersebut.

Studi Literatur

Studi literatur merupakan proses ulasan terhadap buku dan jurnal yang memberikan informasi tentang faktor-faktor yang terkait dengan kerusakan yang sejenis. Faktor-faktor dapat berupa desain *bolt*, gaya-gaya yang berpengaruh dan pola patahan berdasarkan ilmu metalurgi.

Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan untuk mendapatkan data-data awal dari kerusakan. Akan didapatkan informasi-informasi mengenai komponen yang mengalami kegagalan dan informasi mengenai terjadinya kegagalan.

Analisa Gaya pada Komponen

Analisa gaya pada komponen yang mengalami kerusakan dilakukan dengan mencari gaya-gaya yang diterima oleh komponen berdasarkan bentuk dan pemasangan komponen. Hasil dari analisa gaya digunakan untuk menentukan penyebab kerusakan komponen.

Pengamatan Visual

Pengamatan visual dilaksanakan dengan dua jenis metode yaitu pengamatan makroskopik menggunakan bantuan kamera digital dan *stereo microscope*. Pada pengamatan visual jika memungkinkan kita dapat melihat awal retakan, *beach marks* dan akhir patahan.



A



B

Gambar 3.3 [A] Kamera Nikon D700 [B] *Stereo microscope*

Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan guna mengetahui kandungan komposisi kimia yang terdapat baik pada komponen baut yang mengalami kegagalan maupun komponen baut yang baru. Pengujian komposisi kimia dilakukan menggunakan alat *spectrometer* Thermo ARL untuk mengetahui unsur-unsur secara kuantitatif pada komponen baut M30.



Gambar 3.4 *Spectrometer Thermo ARL*

Pengamatan Fraktografi

Pengamatan fraktografi dilakukan untuk mengetahui profil permukaan patahan secara mikro. Sebelum dilakukan proses ini, sampel material dibersihkan untuk menghindari adanya kotoran-kotoran yang menempel seperti oli, debu

dan lain sebagainya. Selanjutnya spesimen dipotong menggunakan mesin *wire cut* menjadi 2 bagian dengan dimensi 10 mm x 10 mm x 5 mm (P x L x T). Pengamatan fraktografi dilakukan dengan menggunakan alat *Scanning Electron Microscope (SEM)*.



Gambar 3.5 *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Persiapan dan Pengujian metalografi

Pada tahap ini akan dibagi menjadi dua tahap yaitu tahap persiapan dan tahap pengujian metalografi. Tahap persiapan meliputi pemotongan, *grinding*, *polishing*, dan *etching* menggunakan *picral* 4%. Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui struktur mikro yang terdapat pada material tersebut. Pengujian metalografi dilakukan pada material yang mengalami kegagalan, selanjutnya hasil yang didapat dibandingkan dengan standar yang ada.



Gambar 3.6 Mikroskop Optik Zeiss

Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan dilaksanakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari material baik material yang patahasifikasi sifat mekanik yang dimiliki material dengan standardisasi yang ada dan kesesuaian dengan desain awal. Pada penelitian ini, pengujian yang dilakukan adalah uji kekerasan *Rockwell C*.



Gambar 3.7 Alat uji kekerasan *Rockwell C*

Pembahasan dan Analisis Data

Pembahasan dan analisis data digunakan untuk menjelaskan fenomena kegagalan berdasarkan data yang didapat serta menjelaskan mekanisme kegagalan yang terjadi. Membandingkan antara material baru, material patah dan standar yang ada menjadi salah satu metode dalam pembahasan dan analisa data.

Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan data-data dan hasil dari pembahasan serta analisis data diperoleh kesimpulan atas penelitian yang telah dilakukan dan saran untuk menanggulangi atau menghindari kasus kegagalan yang serupa.



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Informasi OK Mill FLSmidth 42-4 , Baut dan Data Awal Kerusakan

Adapun data-data mengenai komponen yang akan diteliti dalam studi analisa kegagalan ini adalah sebagai berikut:

1. Nama, Spesifikasi, dan Nomor Kodifikasi

OK Mill FLSmidth 42-4 merupakan *equipment* yang digunakan di Pabrik semen sebagai tempat penggilingan akhir dari produksi semen. Mesin ini digunakan untuk menggiling terak, gipsum dan beberapa jenis bahan aditif. Terdapat komponen-komponen penting pada OK Mill FLSmidth 42-4 yaitu:

- a) *Grinding Table*: Komponen berputar merupakan daerah lintasan terak, gipsum dan bahan aditif pada saat digiling. *Grinding table* terdiri dari dua belas segmen.
- b) *Grinding Roll*: Komponen yang bekerja dengan sistem hidrolik guna memberikan *pressure* pada material yang digiling, terdapat 4 buah *grinding roll* pada OK Mill FLSmidth 42-4.
- c) *Dam Ring*: Komponen yang menjaga agar material tidak jatuh kedalam *rejector*. *Dam ring* berbentuk pelat yang diikat oleh 3 buah baut pada satu segmen grinding table.

Tabel 4.1 *Data Sheet* OK Mill FLSmidth 42-4

Category	Property	Value
Grinding Table	Table material	Ductile iron/steel
	Table diameter	5600 mm
	Table speed	22,2 1/min
	Table segment material	White cast iron (3831)
	Hardness of table track	750 ± 40 HV
	Number of table liners	2 x 12
	Weight of table liners	19692 kg

(lanjutan)

<i>Grinding Rollers</i>	<i>Number of rollers</i>	4
	<i>Roller diameter</i>	2480 mm
	<i>Roller width</i>	1010 mm
	<i>Inclination</i>	15°
	<i>Bearing housing material</i>	Cast Steel (2530)
	<i>Roller segment material</i>	White Cast Iron (3831)
	<i>Hardness of roller tire</i>	750 ± 40 HV
	<i>Thickness of roller liners</i>	220 mm
	<i>Weight of per roller</i>	4808 kg
<i>Dam Ring</i>	<i>Roller bearing lubrication</i>	Circulating oil
	<i>Number of dam ring</i>	12
	<i>Plat dam ring material</i>	A532
	<i>Dimensional plat dam ring (L x W x T)</i>	1462 mm x 100 mm x 135 mm
	<i>Number of bolts, per dam ring</i>	3
	<i>Bolts material</i>	Carbon Steel 8.8/ F568
	<i>Size of Bolt</i>	M30 x 90

2. Unsur-Unsur Penyusun Material Baut pengikat Pelat Dam Ring

Pengujian komposisi kimia dilakukan baik pada penampang material baut *dam ring* yang telah mengalami kegagalan maupun pada penampang material baut *dam ring* yang masih baru. Hasil pengujian dicocokkan dan dibandingkan dengan komposisi kimia standar. Hasil perbandingan dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perbandingan hasil uji komposisi kimia menggunakan *Spectrometer Thermo ARL* dengan komposisi kimia standar material ASTM F568

Komposisi Kimia % by weight	Material Baut Patah	Material Baut Baru	Standar ASTM F568	
			Min	Max
C	0,34553	0,39460	0,25	0,55
Mn	0,83637	0,55768	0,74	...
B	0,00146	0,00004	0,0005	...
P	0,01606	0,01249	...	0,048
S	0,00655	0,00954	...	0,058

Setelah dicocokkan dengan komposisi kimia standar, terlihat bahwa material baut patah dan baut baru telah sesuai dengan standar ASTM F568, *property class carbon steel 8.8* dengan perlakuan *quenching* dan *tempering*. Terdapat perbedaan yang signifikan pada unsur mangan dan boron. Mangan berperan dalam meningkatkan kekuatan, kekerasan baja, dan meningkatkan ketahanan terhadap abrasi. Hal ini dapat terjadi karena mangan mampu mengikat belerang, sehingga memperkecil terbentuknya sulfida besi yang menyebabkan abrasi. Boron berperan dalam meningkatkan *machinability* dan kekerasan material. Fosfor berperan dalam meningkatkan kekuatan, meningkatkan *hardenability* dan ketahanan terhadap korosi. Fosfor bertanggungjawab atas penurunan keuletan dan ketangguhan. Sulfur apabila dikombinasikan dengan mangan dapat meningkatkan *machinability*.^[15]

Baut yang patah memiliki nilai mangan dan boron lebih tinggi dari pada baut yang baru. Secara otomatis nilai kekerasan baut yang mengalami kegagalan juga lebih tinggi dibanding dengan baut yang baru. Nilai kekerasan yang tinggi menyebabkan mudahnya terbentuk retakan akibat adanya takikan.

Sifat Mekanik

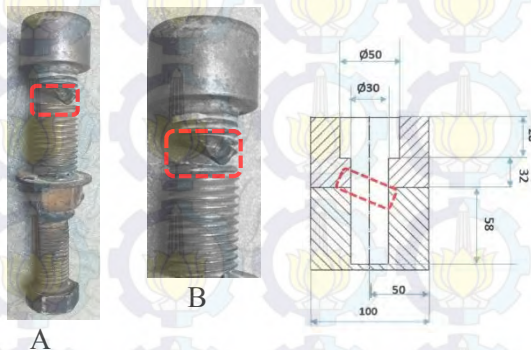
Adapun sifat mekanik material ASTM F568 adalah sebagai berikut.

Tabel 4.3 *Mechanical Properties for Bolts, Screw and Studs ASTM F568*

Property Class	Nominal Diameter	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness	
		Min	Min	Min	Min	Rockwell	
8.8	M16-M72	660	830	12	35	C23	C34

3. Data Awal Kerusakan

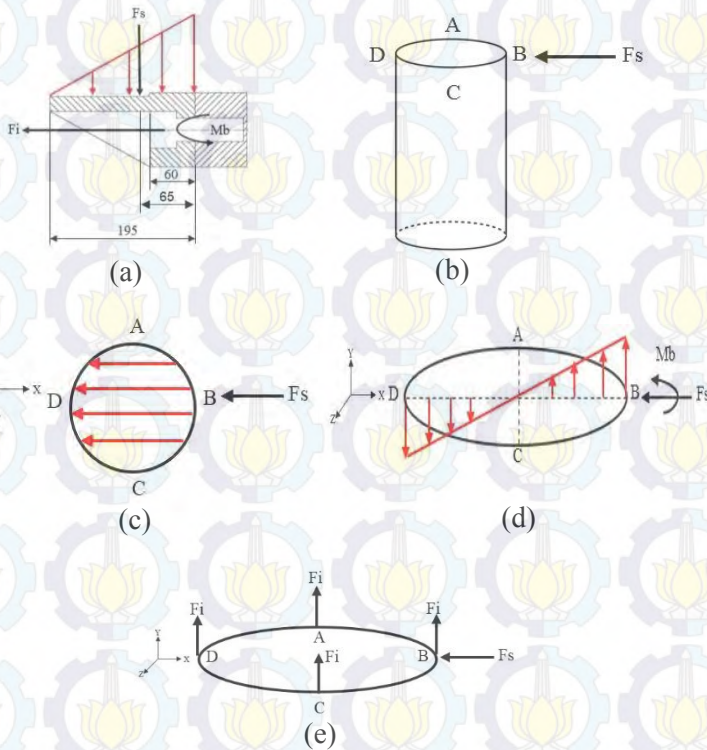
Pada awal juli 2015 OK Mill FLSmidth 42-4 mengalami trip akibat putusnya baut pengikat dam ring. Kejadian ini kurang lebih terjadi setiap 2-3 bulan sekali selama 1 tahun terakhir. Patahan terjadi di *interface* antara sambungan *dam ring* dan *grinding table* seperti yang terlihat pada gambar 4.1. Baut pengikat *dam ring* itu dikencangkan dengan torsi pengencangan awal 1060 Nm.



Gambar 4.1 [A] Baut M30 yang mengalami kegagalan posisi pemasangan patahan masih menempel akibat pengelasan pada saat proses pengambilan baut [B] kegagalan baut terlihat patah pada interface [C] sketsa penampang melintang baut

4.2 Analisa Kesesuaian Diameter Baut dengan Gaya yang Bekerja

Analisa kesesuaian diameter baut dengan gaya yang bekerja guna untuk memastikan apakah material baut tersebut mampu menahan tegangan yang bekerja. Selanjutnya, dapat berguna mengidentifikasi kegagalan yang terjadi.



Gambar 4.2 [a] Sketsa gaya-gaya yang bekerja pada baut [b] gaya penampang muka baut [c] distribusi tegangan geser [d] distribusi tegangan akibat momen [e] pengaruh gaya inisial tampak atas dari baut

Dimana :

F_i adalah Gaya inisial yang bekerja akibat pengencangan torsi

F_s adalah Gaya sentrifugal

M_b adalah Momen bending

F_i disebut gaya inisial yang timbul akibat pengencangan torsi pada baut M30 tersebut. F_i selanjutnya menjadi tegangan tarik dengan notasi σ_{fi} . F_s disebut gaya sentrifugal yang berasal dari massa *clinker*/terak yang berputar dan seolah-olah terlempar keluar lintasan. F_s selanjutnya menjadi tegangan geser dengan notasi τ_{xy} . M_b adalah momen *bending* yang timbul akibat gaya geser yang dipindahkan. M_b menimbulkan tegangan tarik dan tegangan tekan, dengan notasi σ_{Mb} .

$$F_i = \frac{T}{C \cdot D_b} \quad [14]$$

Dimana :

T adalah applied torque [Nm]

C adalah coefficient torque [0,2 for unlubricated bolt]

D_b adalah Diameter bolt [m]

Mencari gaya inisial akibat pengencangan baut

$$F_i = \frac{T}{C \cdot D_b}$$

$$F_i = \frac{1060 \text{ Nm}}{0,2 \times 0,03 \text{ m}}$$

$$F_i = \frac{1060 \text{ Nm}}{0,2 \times 0,03 \text{ m}}$$

$$F_i = 176666,67 \text{ N}$$

Mencari gaya sentrifugal akibat material yang digiling

F_s didapat dari persamaan sebagai berikut.

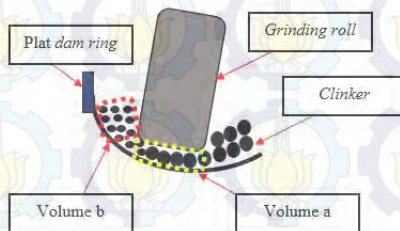
$$F_s = M_m \times \omega^2 \times R_t$$

Dimana :

M_m adalah massa clinker yang digiling [kg]

ω adalah kecepatan sudut grinding table [rad/s]

R_t adalah radius grinding table [m]



Gambar 4.3 Sketsa proses penggilingan material

Pada gambar 4.3 , volume a diasumsikan sama dengan volume b. Volume a merupakan terak (*clinker*) yang sedang digiling sedangkan volume b adalah terak (*clinker*) yang sudah mengalami proses penggilingan.

$$M_m = \rho \times V_b$$

$$V_a = V_b = A_f \times h$$

$$A_f = A_s \times 0,25$$

$$A_s = (2\pi R_r(t_r + R_r)) - (2(\pi R_r^2))$$

Dimana:

M_m adalah massa terak yang terdapat pada volume b [kg]

$V_a = V_b$ adalah volume terak

ρ adalah massa jenis dari terak $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

A_f adalah luas tapak tekan pada grinding roll $[\text{m}^2]$

h adalah bed depth (kedalaman material) [m]

A_s adalah luas selimut yang berguna menggiling terak $[\text{m}^2]$

t_t adalah tebal grinding roll [m]

R_r adalah radius grinding roll [m]

Mencari luasan selimut *grinding roll*

$$A_s = (2\pi R_r(t_r + R_r)) - (2(\pi R_r^2))$$

$$A_s = (2 \times \pi \times 1,24 \text{ m}(1,01 \text{ m} + 1,24 \text{ m})) - (2\pi \times (1,24 \text{ m})^2)$$

$$A_s = 7,865 \text{ m}^2$$

Mencari luas tapak tekang *grinding roll*

$$A_f = A_s \times 0,25$$

$$A_f = 7,865 \text{ m}^2 \times 0,25$$

$$A_f = 1,966 \text{ m}^2$$

Mencari volume material terak yang digiling

$$V_a = V_b = A_f \times h$$

$$V_a = V_b = 1,966 \text{ m}^2 \times 0,035 \text{ m}$$

$$V_a = V_b = 0,0688 \text{ m}^3$$

Mencari massa terak

$$M_m = \rho \times V_b$$

$$M_m = 2100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,0688 \text{ m}^3$$

$$M_m = 144,48 \text{ kg}$$

Mencari kecepatan sudut ω

$$1 \text{ rpm} = 0,1047 \text{ rad/s}$$

$$22,2 \text{ rpm} = 2,32 \text{ rad/s}$$

$$\omega = 2,32 \text{ rad/s}$$

Mencari gaya sentrifugal ditinjau dari volume yang digiling

$$F_s = M_m \times \omega^2 \times R_t$$

$$F_s = 144,48 \text{ kg} \times (2,32 \text{ rad/s})^2 \times 2,8 \text{ m}$$

$$F_s = 2177,417 \text{ N}$$

Diameter *grinding roll* sebesar 2480 mm sementara panjang 1 segmen *dam ring* adalah 1461 mm . 1 segmen pelat *dam ring* diikat oleh 3 baut. Diasumsikan gaya sentrifugal yang bekerja secara konsentris ditanggung sama rata oleh 5 buah baut.

$$F_{s1} = \frac{2177,417 \text{ N}}{5}$$

$$F_{s1} = 435,483 \text{ N}$$

Menghitung momen *bending*

$$M_b = F_{s1} \cdot \ell$$

$$M_b = 435,483 \text{ N} \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,195 \text{ m}$$

$$M_b = 28,3 \text{ Nm}$$

Pada gambar 4.2 [a] terlihat distribusi gaya sentrifugal. Ketika sebuah gaya dipindahkan maka timbul momen dengan lengan yang tegak lurus dengan gaya tersebut. Titik b merupakan daerah yang terkena tegangan paling besar akibat adanya momen yang bernilai positif , titik a dan c merupakan daerah yang tidak memiliki momen akibat *bending* , sementara titik d memiliki momen *bending* tetapi bernilai negatif.

Titik B

Berdasarkan ISO 898 *part 1*, harga cross sectional area baik untuk tensile *stress* maupun *shear stress* pada baut M30 adalah sebagai berikut.

$$A_{ts} = 560,587 \text{ mm}^2$$

$$A_{ss} = 1121,1744 \text{ mm}^2$$

Menghitung σ_{fi}

$$\sigma_{fi} = \frac{F_i}{A_{ts}}$$

$$\sigma_{fi} = \frac{176666,67 \text{ N}}{560,587 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{fi} = 315,15 \text{ MPa}$$

Menghitung τ_{xy}

$$\tau_{xy} = \frac{F_{s1}}{A_{ss}}$$

$$\tau_{xy} = \frac{435,483 \text{ N}}{1121,1744 \text{ mm}^2}$$

$$\tau_{xy} = 0,388 \text{ MPa}$$

Menghitung σ_{Mb}

$$\sigma_{Mb} = \frac{M \cdot c}{I}$$

Dimana:

σ_{Mb} adalah tegangan principal akibat momen bending [MPa]

c adalah lengan yang tegak lurus (jari – jari baut) [m]

I adalah momen inersia [m^4]

$$\sigma_{Mb} = \frac{28,3 \text{ Nm} \cdot 0,015 \text{ m}}{\pi/64 \cdot (0,03 \text{ m})^4}$$

$$\sigma_{Mb} = 10,68 \text{ MPa}$$

Pada beban *fatigue* terdapat tegangan maksimum dan tegangan minimum, sehingga

$$\sigma_{max} = \sigma_{fi} + \sigma_{Mb} = 325,83 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{min} = \sigma_{fi} = 315,15 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{avg} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = 320,49 \text{ MPa}$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = 5,342 \text{ MPa}$$

$$\tau_{max} = \tau_{xy} = 0,3888 \text{ MPa}$$

$$\tau_{min} = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau_{avg} = \frac{\tau_{xy}}{2} = 0,194 \text{ MPa}$$

$$\tau_r = \frac{\tau_{xy}}{2} = 0,194 \text{ MPa}$$

Menentukan kesesuaian baut dengan *Fluctuating and Shock Load Theory*

$$\frac{S_{yp}}{N} \geq \sqrt{K_{sb} \left(\sigma_{avg} + \frac{S_{yp}}{S_e} \sigma_r \right)^2 + 3K_{st} \left(\tau_{avg} + \frac{S_{yp}}{S_{es}} \tau_r \right)^2} \quad [14]$$

$$\frac{660 \text{ MPa}}{2} \geq \sqrt{1,5 \left(320,49 \text{ MPa} + \frac{660 \text{ MPa}}{60,45 \text{ MPa}} 5,34 \text{ MPa} \right)^2 + 3 \cdot 1,5 \left(0,194 \text{ MPa} + \frac{382,8}{35,06} 0,194 \text{ MPa} \right)^2}$$

$$330 \text{ MPa} \geq \sqrt{215273,6}$$

$$330 \text{ MPa} \leq 463,976 \text{ MPa (gagal)}$$

Berdasarkan *fluctuating and shock load theory* ketika tegangan yang bekerja lebih besar dari tegangan ijin, maka baut tersebut dinyatakan **gagal**.

Dimana:

S_{yp} adalah stress yield point [MPa]

S_{syp} adalah shear stress yield point [MPa]

N adalah angka keamanan

K_{sb} adalah shock factor for bending, tension or compression

K_{st} adalah shock factor for torsion

σ_{avg} adalah tegangan principal rata – rata [MPa]

σ_r adalah range tegangan principal [MPa]

τ_{avg} adalah tegangan geser rata – rata [MPa]

τ_r adalah range tegangan geser [MPa]

S_e adalah corrected endurance limit $\left(C_R C_S C_F S'_n \frac{1}{K_f} \right)$ [MPa]

S_{es} adalah corrected endurance limit for shear $\left(C_R C_S C_F S'_{ns} \frac{1}{K_{fs}} \right)$ [MPa]

Menggunakan baut carbon steel 10.9

Apabila menggunakan carbon steel 10.9 , maka perhitungannya adalah sebagai berikut.

$$\frac{S_{yp}}{N} \geq \sqrt{K_{sb} \left(\sigma_{avg} + \frac{S_{yp}}{S_e} \sigma_r \right)^2 + 3K_{st} \left(\tau_{avg} + \frac{S_{syp}}{S_{es}} \tau_r \right)^2} \quad [14]$$

$$\frac{940 \text{ MPa}}{2} \geq \sqrt{1,5 \left(320,49 \text{ MPa} + \frac{940 \text{ MPa}}{71,53 \text{ MPa}} 5,34 \text{ MPa} \right)^2 + 3 \cdot 1,5 \left(0,194 \text{ MPa} + \frac{545,2}{41,489} 0,194 \text{ MPa} \right)^2}$$

$$470 \text{ MPa} \leq 478,52 \text{ MPa (gagal)}$$

Menggunakan baut carbon steel 12.9

Apabila menggunakan carbon steel 12.9 , maka perhitungannya adalah sebagai berikut.

$$\frac{S_{yp}}{N} \geq \sqrt{K_{sb} \left(\sigma_{avg} + \frac{S_{yp}}{S_e} \sigma_r \right)^2 + 3K_{st} \left(\tau_{avg} + \frac{S_{syp}}{S_{es}} \tau_r \right)^2} \quad [14]$$

$$\frac{1100 \text{ MPa}}{2} \geq \sqrt{1,5 \left(320,49 \text{ MPa} + \frac{1100 \text{ MPa}}{78,98 \text{ MPa}} 5,34 \text{ MPa} \right)^2 + 3 \cdot 1,5 \left(0,194 \text{ MPa} + \frac{638}{45,807} 0,194 \text{ MPa} \right)^2}$$

$$550 \text{ MPa} \geq 483,68 \text{ MPa (aman)}$$

Berdasarkan *fluctuating and shock load theory* ketika tegangan yang bekerja lebih kecil dari tegangan ijin material, maka baut tersebut dinyatakan **aman**. Hasil perhitungan pada kondisi kerja yang sama hanya baut *carbon steel* 12.9 yang memenuhi standar keamanan berdasarkan *fluctuating and shock load theory*.

4.3 Menghitung kurva S-N

Kurva S-N adalah karakteristik *fatigue* yang umum digunakan dari suatu bahan yang mengalami tegangan berulang^[21]. Kurva dapat diperoleh dengan cara tes spesimen yang diberi beban berulang dengan jumlah N siklus sampai terjadi kegagalan dan dengan metode pendekatan perhitungan prediksi umur *fatigue*. Kurva S-N pada material ASTM F568 melalui pendekatan perhitungan prediksi umur *fatigue* berdasarkan properties material adalah sebagai berikut.

Diketahui:

$$S_{uts} = 830 \text{ MPa} = 120,381 \text{ ksi}$$

$$S_e' = 0,5 \times S_{uts} = 415 \text{ MPa} = 60,2 \text{ ksi}$$

$$S_l' = 0,9 \times S_{uts} = 747 \text{ MPa} = 108,343 \text{ ksi}$$

$$S_f = 315,15 \text{ MPa} = 45,708 \text{ ksi}$$

Persamaan garisnya adalah $y = ax + c$

$$\log S_f = a(\log N) + c$$

$$\log S_l' = a(\log 10^3) + c = 3a + c$$

$$\log S_e' = a(\log 10^6) + c = 6a + c$$

$$a = -\frac{1}{3} \log \frac{S_l'}{S_e'}$$

$$a = -\frac{1}{3} \log \frac{108,343}{60,2}$$

$$a = -0,085$$

$$c = \log \frac{(S_l')^2}{S_e'}$$

$$c = \log \frac{(108,343)^2}{60,2}$$

$$c = 2,3$$

Fatigue life dapat dihitung menggunakan persamaan.

$$N = (S_f \times 10^{-c})^{1/a}$$

$$N = (S_f \times 10^{-c})^{1/a}$$

$$N = (67,3 \text{ kPsi} \times 10^{-2,3})^{1/-0,085}$$

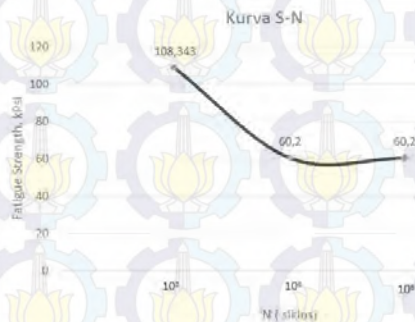
$$N = 3,57 \times 10^6 \text{ [22]}$$

Dimana :

S_f adalah stress failure [MPa]

N adalah jumlah siklus

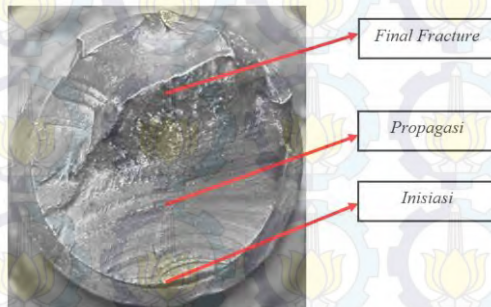
Berdasarkan ASM volume 19 tentang *fatigue and fractures* apabila siklus tegangan yang terjadi lebih dari 10^5 , maka termasuk kategori *high cycle fatigue* dengan pembebanan rendah (*low load*).



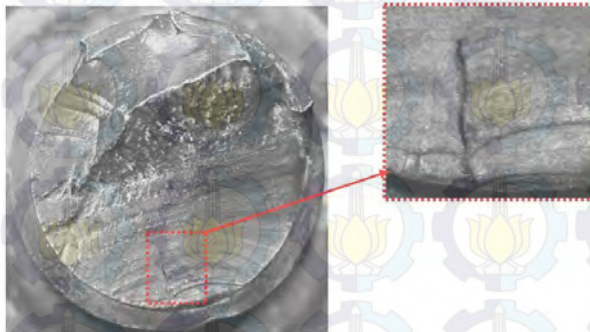
Gambar 4.4 Kurva S-N ASTM F568

4.3 Pengamatan Visual dan Makroskopis

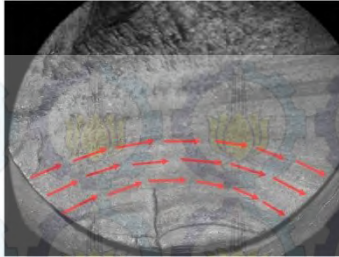
Pengamatan visual dilakukan untuk melihat kondisi material baut yang mengalami kegagalan.



Gambar 4.5 Daerah inisiasi, propagasi dan *final fracture* pada baut M30 dari OK Mill FLSmidth 42-4

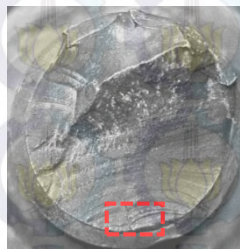


Gambar 4.6 Awal retakan pada baut yang mengalami kegagalan



Gambar 4.7 Pola *beach marks* pada daerah propagasi

Pada patah *fatigue* terdapat daerah yang berupa inisiasi, *crack propagation* dan *final fracture*. Kegagalan suatu material yang terindikasi *fatigue* dapat segera dikenali bila ada tanda-tanda perambatan retak seperti *beach marks*. *Beach marks* berkembang dari sumber retakan kemudian terus berkembang hingga terjadi *final fracture*. Proses inisiasi diawali dengan retakan pada arah jam 6 seperti pada gambar 4.6 selanjutnya *beach marks* menjalar hingga ketengah penampang baut seperti yang terlihat pada gambar 4.7 yang menandai terjadinya propagasi. Daerah propagasi sejalan dengan arah pembebanan. Luas penampang yang tersisa tidak lagi mampu menahan tegangan yang bekerja, sehingga baut tersebut patah [6].

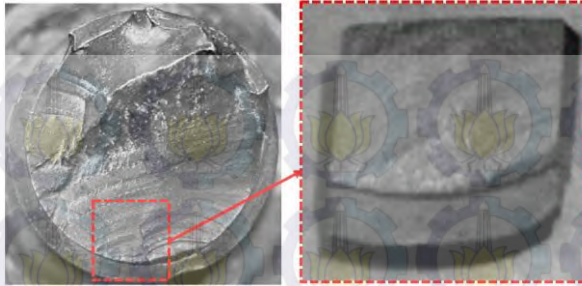


Gambar 4.8 [A] Skematik permukaan patah *fatigue* berdasarkan ASM volume 12 [B] Penampang patahan baut M30 dari OK Mill FLSmith 42-4

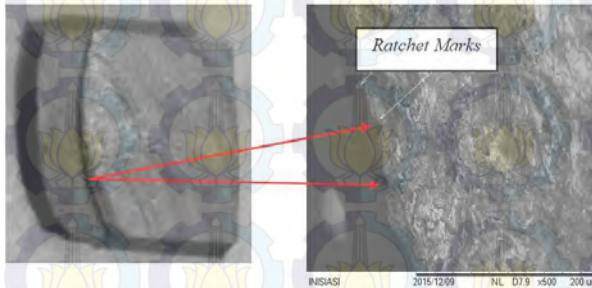
Pada gambar 4.8 [A] dan [B] terlihat representasi dari penampang permukaan patahan *fatigue* yang masuk dalam kategori *unidirectional bending* pada *low nominal stress* sesuai standar *ASM volume 12 fractography*. *Unidirectional bending* terjadi ketika benda menerima beban *bending* dari satu arah kemudian beban tersebut dilepaskan secara berulang ulang. Fenomena ini mirip dengan kasus kegagalan yang terjadi pada baut *dam ring* M30 OK Mill FLSmidth 42-4. Ketika ada beban, gaya geser yang bekerja memberikan momen *bending*. Mula-mula terjadi retakan pada arah jam 6 kemudian retakan menjalar membentuk *beach marks* sampai ke tengah penampang baut. Perambatan retak terus berjalan, sehingga semakin sedikit luasan material yang tersisa untuk menahan tegangan yang terjadi dan patah tidak dapat dihindarkan. Pada tahapan *final fracture* seolah-olah material mengalami patah statik akibat luasan material yang tidak mampu menahan tegangan yang bekerja.

4.4 Pengamatan Fraktografi

Pengamatan fraktografi bertujuan untuk menganalisa mode kegagalan kemudian mencoba untuk menghubungkan hasil topografi dari permukaan patahan dengan penyebab-penyebab kegagalan berdasarkan mekanisme-mekanisme patahan^[9]. Spesimen dipotong menjadi 2 bagian yang menggunakan mesin *wire cut* dengan dimensi 10 mm x 10 mm x 5 mm. Pengamatan fraktografi dilakukan menggunakan alat *Scanning Electron Microscope* (SEM). Dari hasil SEM, didapatkan gambar berikut.

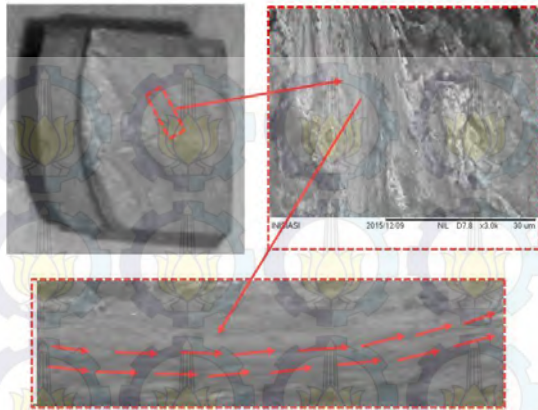


Gambar 4.9 Spesimen 1 pengujian *Scanning Electrone Microscope (SEM)*



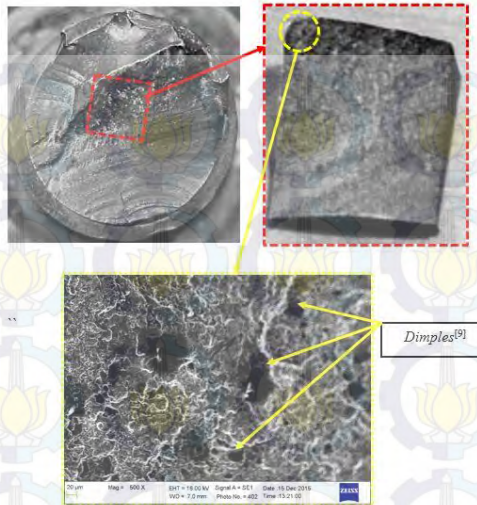
Gambar 4.10 Hasil *SEM* spesimen 1 dengan perbesaran 500x dekat daerah inisiasi

Ciri-ciri patah *fatigue* dapat ditandai dengan munculnya beberapa *ratchet marks* pada daerah inisiasi. Biasanya *ratchet marks* memiliki orientasi yang tegak lurus terhadap tangensial dari permukaan singgung luasan permukaan patahan. Pada gambar 4.10 hasil SEM dengan perbesaran 500x menunjukkan adanya 2 buah *ratchet marks* yang ditunjuk dengan panah berwarna merah. *Ratchet marks* adalah titik-titik inisiasi pada kegagalan *fatigue*. Konsterasi tegangan yang besar pada daerah luar permukaan menyebabkan titik-titik inisiasi bermunculan, tetapi ada beberapa kasus kegagalan *fatigue* hanya memiliki satu titik inisiasi ^[16].



Gambar 4.11 Hasil *SEM* spesimen 1 dengan perbesaran 3000x pada daerah propagasi

Striasi adalah pola yang menunjukkan siklus tegangan fluktuatif yang dialami oleh suatu komponen suatu waktu. Striasi hanya dapat dilihat dengan perbesaran tinggi, sementara *beach marks* dapat terlihat dengan mata telanjang. Tidak semua material yang mengalami patah *fatigue* dapat menunjukkan adanya striasi. Striasi dapat secara jelas terlihat pada *pure metals* dan aluminium. Pada gambar 4.11 striasi dapat terlihat pada perbesaran 3000x menggunakan *Scanning Electron Microscope*. Striasi biasanya diamati pada daerah propagasi. Beberapa literatur menyebutkan bahwa setiap striasi menunjukkan satu siklus pembebanan. Striasi menjalar sesuai dengan arah pembebanan^[6].



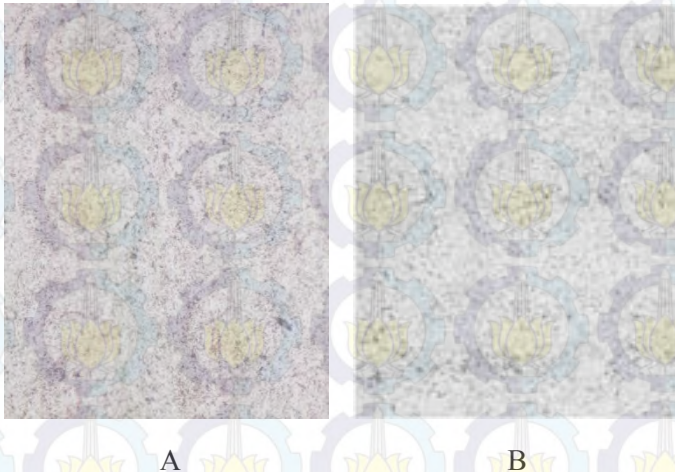
Gambar 4.12 Hasil Spesimen 2 pengujian SEM perbesaran 500x dekat *final fracture*

Hasil pengamatan permukaan patahan pada spesimen 2 yang merupakan daerah propagasi dan *final fracture* dengan SEM menunjukkan terdapat *dimples* seperti pada gambar 4.12. Patah *dimples* terjadi karena bergabungnya *microvoid* akibat adanya deformasi dari beban berlebih. Awal *microvoids* terbentuk pada daerah *strain discontinuity*, seperti penggabungan fase kedua dari partikel, inklusi dan batas butir, kemudian *microvoid* bergabung membentuk penampang patahan.

Tipe dari patahan ini menunjukkan sejumlah cekungan-cekungan sebagai hasil dari penggabungan *microvoid*. Cekungan-cekungan ini dikenal dengan *dimples*. Ukuran-ukuran *dimples* pada penampang patahan tergantung pada jumlah dan distribusi *microvoid* yang terbentuk. Pada gambar 4.12 terlihat ukuran *dimples* yang besar yang menandakan bahwa material tersebut ulet dan elastis ^[9].

4.5 Pengamatan Metalografi

Pengamatan metalografi digunakan untuk mengetahui apakah mikrostruktur antara baut yang mengalami kegagalan sesuai dengan perlakuan panas yang dialami material tersebut. Dari hasil pengamatan didapat data sebagai berikut.



Gambar 4.13 Hasil Uji Metalografi pada [A] Material baut M30 dengan perbesaran 500x [B] Material *seamless pipe medium carbon steel* API 5AC , Grade C-90 perbesaran 500x.

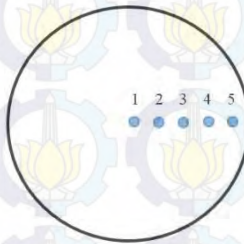
Pada laju pendinginan yang sangat cepat dari temperatur *austenite* ke temperatur ruang akan menyebabkan terjadinya transformasi fasa dari fasa *austenite* menjadi fasa *martensite*. *Martensite* merupakan fasa yang *metastable*. Transformasi pembentukan *martensite* akan berakhir pada temperatur dibawah 0° celcius, sehingga bila baja didinginkan dengan cepat sampai temperatur ruang, masih terdapat sisa *austenite*. Hal ini menyebabkan pengerasan baja menjadi tidak optimal. *Austenite* sisa tergantung pada kandungan karbon. Semakin tinggi kandungan karbon semakin besar pula kemungkinan terdapatnya *austenite* sisa ^[20].

Austenite sisa dapat dihilangkan dengan perlakuan yang disebut dengan *subzero treatment* yaitu pendinginan lanjut dibawah 0° celcius. Dengan perlakuan ini semua *austenite* sisa dapat bertransformasi menjadi *martensite*. Cara lain dengan perlakuan panas *tempering*, sehingga menghasilkan *tempered martensite*. *Tempering* berfungsi menghilangkan tegangan sisa, memperbaiki *machinability*, meningkatkan *toughness* dan *ductility* dari suatu material. *Tempered martensite* tersusun atas *small particle* yang berupa *cementite* dan matriks berupa *ferrite*. *Cementite* cenderung lebih keras sementara *ferrite* cenderung ductile dan memiliki ketangguhan yang tinggi, sehingga diperoleh sifat mekanik yang cenderung keras, tetapi memiliki ketangguhan dan keuletan yang cukup tinggi, hal tersebut juga diperkuat dengan pengujian kekerasan dan pengamatan *fractography*. Pengamatan *fractography* menunjukkan adanya *dimples* yang merupakan indikasi bahwa material tersebut *ductile*^[19].

Baut M30 dari OK Mill FLSmidth 42-4 mendapat perlakuan *quenching* dan *tempering*. Pengujian metalografi menggunakan picral 4% sebagai etsa dan spesimen berasal dari material yang mengalami kegagalan. Pada gambar 4.13 [A] hasil dari pengamatan metalografi menunjukkan struktur *tempered martensite* yang sangat kecil. Tidak terdapat perbedaan antara material baut hasil uji metalografi dengan atlas metalografi berdasarakan *ASM volume 9 metallography and microstructures* seperti pada gambar 4.13 [B]. Spesimen yang digunakan pada atlas merupakan medium carbon steel dengan persentase karbon 0,15%-0,26% , yang dilakukan pemanasan awal pada suhu 870° C , di *quenching* menggunakan air selanjutnya material *ditemper* pada suhu 750° kemudian menggunakan picral sebagai etsa^[17].

4.6 Pengujian kekerasan

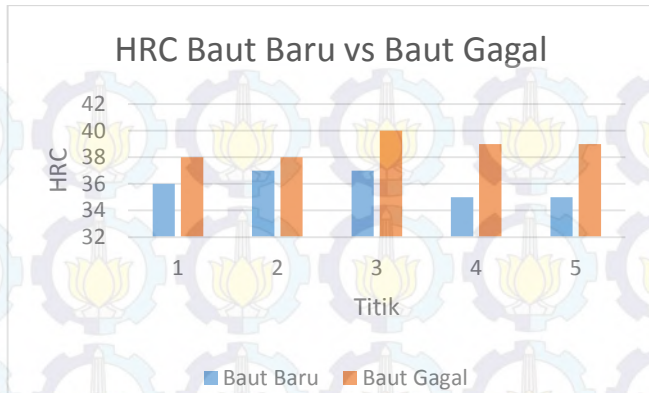
Pengujian kekerasan dilakukan pada material baut menggunakan uji kekerasan Rockwell tipe C. Pengujian dilakukan pada 2 spesimen, yakni spesimen baut dengan jari-jari 3 cm. Detail pengujian dilakukan dari titik tengah menuju titik luar sebanyak 5 titik, seperti terlihat pada gambar 4.14.



Gambar 4.14 Posisi indentasi pada pengujian kekerasan Rockwell C

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kekerasan Rockwell C

Material	Nilai HRC					Rata-rata
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	
Baut Gagal	38	38	40	39	39	38,8
Baut Baru	36	37	37	35	35	36



Gambar 4.15 Grafik HRC baut baru versus baut gagal

Berdasarkan gambar 4.15 hasil pengujian kekerasan dari diameter dalam hingga kearah luar didapatkan bahwa rata-rata nilai kekerasan di daerah patahan lebih besar daripada baut baru masing-masing adalah 38,8 HRC dan 36 HRC. Hal ini bisa saja disebabkan oleh adanya *internal stress* akibat beban *bending* yang ada di daerah patahan, sehingga mengakibatkan kekerasan naik^[18]. Standar ASTM F568 nilai kekerasan yang seharusnya berkisar 23 hingga 34 HRC. Baik baut yang mengalami kegagalan maupun baut baru dapat dikatakan nilai kekerasannya tidak sesuai dengan standar.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data hasil penelitian yang dibahas sebelumnya, kesimpulan yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Kegagalan baut *dam ring* M30 pada OK Mill FLSmidth 42-4 termasuk kegagalan *fatigue* akibat fluktuasi tegangan kombinasi antara gaya inisial yang menghasilkan tegangan tarik, gaya sentrifugal yang menghasilkan tegangan geser, dan momen *bending* menghasilkan tegangan tarik dan tekan. Jenis kelelahan *fatigue* yang terjadi adalah *high cycle fatigue*, karena nilai N lebih besar dari 10^5 . Hal ini terlihat jelas dari penampang patahan yang menampilkan *beach marks*. *Beach marks* menunjukkan bahwa siklus *fatigue* terjadi dalam tempo yang relatif lama. Berdasarkan *ASM volume 12 fractography*, skematik jenis patahan yang terlihat adalah *unidirectional bending* pada *low nominal stress*.
2. Berdasarkan perhitungan bahwa dengan tegangan yang bekerja lebih besar daripada tegangan ijin material sehingga baut *carbon steel* 8.8 dinyatakan gagal berdasarkan *fluctuating and shock load theory*.
3. Bahan baut yang digunakan pada OK Mill FLSmidth melebihi standar kekerasan ASTM F568. Nilai kekerasan pada material baut yang mengalami kegagalan mencapai 38,8 HRC, sedangkan batas maksimal kekerasan ASTM F568 hanya 34 HRC. Karena kekerasannya tidak sesuai standar baut tersebut sangat sensitif terhadap bentuk takikan yang mudah menimbulkan retakan.

5.2 Saran

Berdasarkan data hasil penelitian dan kesimpulan yang didapat, saran dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memperhatikan nilai kekerasan pada baut jangan sampai nilai kekerasan baut melebihi standar yang diajarkan guna menghindari mudahnya terbentuk retakan akibat adanya takikan.
2. Mengganti baut carbon steel 8.8 dengan baut *carbon steel* 12.9 berdasarkan *fluctuating and shock load theory*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hudgins Alex. 2014. *"Fatigue of thread Fasteners"*. Menlo Park, California
- [2] Hatta Ilham. 200. *"Analisa Kerusakan Baut pengikat Meja Putar pada Sistem Tranportasi Alat Angkat"*. Volume 3, No 1.
- [3] International Thread Standards (<http://www.gewinde-normen.de/en/>, diakses tanggal 20 Oktober 2015)
- [4] Budynas, R. G., Nisbett, J. K., 2011. Shigley's Mechanical Engineering Design. New York: McGraw-Hill
- [5] Eccles, Bill. 2011. Why Nuts and Bolts can Self-Loosen. Bolt.Science. (http://www.boltscience.com/pages/Why_nuts_and_bolts_can_self-loosen.pdf, diakses tanggal 20 Oktober 2015)
- [6] ASM Handbook Committee. 2002. ASM Metals Handbook Vol. 19 : Fatigue and Fracture. Ohio, Amerika : ASM International
- [7] Janssen, M., Zuidema, J., dan Wanhill, R. J. H. 2004. Fracture Mechanics 2nd Edition. London dan New York : Spon Press
- [8] Fuchs, H.O dan Stephens, R.I. 1980. Metal Fatigue in Engineering. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [9] ASM Handbook Committee. 2002. *"ASM Metals Handbook Vol.12: Fractography"*. Ohio:ASM International.
- [10] Moeser, Martin. 2007. Fractography with SEM. Failure Analysis chapter 15 (<http://martin-moeser.de/Images/Fractography.html>, diakses tanggal 21 Oktober 2015)

- [11] R. Brooks Charlie, Choudhury Ashok. 2002. Failure Analysis of Engineering Materials. New York : McGraw-Hill
- [12] Berata Wajan. “*Diktat Elemen Mesin I*”. Surabaya: Teknik Mesin FTI-ITS
- [13] Arsa, K., Ir, 1995, “*Diktat Teknologi Semen PT Semen Indonesia (Persero) Tbk*”. PT Semen Indonesia (Persero) Tbk, Tuban.
- [14] Deutschman, A.D., Michels, W.J., dan Wilson, C. F. 1975. “*Machine Design Theory and Practice*”. New York: Macmillan Publishing Co., Inc.
- [15] Sheir, L.L. 2000. “*Corrosion Volume I Metal/Environment Reaction 3rd ed*”. Great Britanian: Butterworth Heinemann
- [16] Anonymous. “Fatigue Surface Initiation” (http://www.uniones.com/watermark/Fatigue_surface_initiation.pdf, diakses tanggal 4 januari 2015)
- [17] ASM Handbook Committee. 2002. “*ASM Metals Handbook Vol.9: Metallography*”. Ohio: ASM International.
- [18] Ibad Khoirul Ilham dan Rochiem Rochman. 2014. “Analisa Kegagalan Baut Vvcp Gas Kompresor Gemini Ds-504 Emp Malacca Strait Sa”. Surabaya: Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
- [19] <http://smt.sandvik.com/en/products/strip-steel/strip-products/knife-steel/hardening-guide/purpose-of-hardening-and-tempering/has-the-hardening-been-correctly-done/> (diakses tanggal 4 januari 2015)
- [20] ASM Handbook Committee. 2002. “*ASM Metals Handbook Vol.4: Heat Treating*”. Ohio: ASM International.

[21] Callister, Jr, William D. 2007. *Materials Science and Engineering An Introduction Seven Edition*, John Wiley and Sons, Inc, United States of America.

[22] Y. Zhu. 2007. Fatigue Strength. MAE 316-Strength of Mechanical Components.
(http://www.mae.ncsu.edu/zhu/courses/mae316/lecture/9-fatigue_shig.pdf, diakses tanggal 17 Januari 2016)





LAMPIRAN

12/18/2015 1:37:4 PM Samples: BOLT Program: LASTEEL Task: LASTEEL										
Run	FE%	C	Mn	P	S	Si	So	Al	Al004	
1>	97.6603	0.38544	0.55530	0.01229	0.00951	0.24208	0.00459	0.00461	0.0042	
2>	97.6677	0.38181	0.53395	0.01233	0.00909	0.24241	0.00481	0.00722	0.0046	
3>	97.6034	0.41657	0.53879	0.01285	0.01003	0.24621	0.00485	0.00737	0.0048	
Avg	97.6438	0.39460	0.55268	0.01249	0.00954	0.24357	0.00475	0.00707	0.0045	
Std	0.0352	0.01911	0.00579	0.00031	0.00047	0.00236	0.00014	0.00040	0.0003	
Std%	0.0360	4.84173	1.03910	2.51653	4.99921	0.94255	2.94911	5.69054	6.6493	
	Cr	Cu	Ni	Mb	V	Pb	Ca	Mg	Co	
1>	0.95816	0.09144	0.03268	0.00264	0.00528	-0.00223	0.00092	0.01169	0.007	
2>	0.95499	0.09198	0.03277	0.00282	0.00535	-0.00220	-0.00101	0.01194	0.007	
3>	0.96267	0.09369	0.03324	0.00317	0.00549	-0.00214	0.00124	0.01208	0.007	
Avg	0.95841	0.09237	0.03290	0.00288	0.00537	-0.00219	0.00106	0.01190	0.007	
Std	0.00385	0.00118	0.00030	0.00026	0.00011	0.00005	0.00017	0.00020	0.000	
Std%	0.40240	1.27418	0.92203	8.91722	2.02054	-2.23848	15.75120	1.64054	1.378	
	B	W	N	Ti	Te	F	CE	IS		
1>	0.00003	0.00578	0.00658	0.00361	0.00009	0.635	0.681	89.629		
2>	0.00004	0.00565	0.00619	0.00353	-0.00016	0.638	0.677	89.182		
3>	0.00006	0.00655	0.00444	0.00367	0.00091	0.650	0.715	93.012		
Avg	0.00004	0.00599	0.00640	0.00360	0.00028	0.641	0.691	90.608		
Std	0.00002	0.00049	0.00020	0.00007	0.00056	0.008	0.021	2.094		
Std%	37.29182	8.09909	3.08960	1.90914	201.38876	1.191	3.030	2.311		

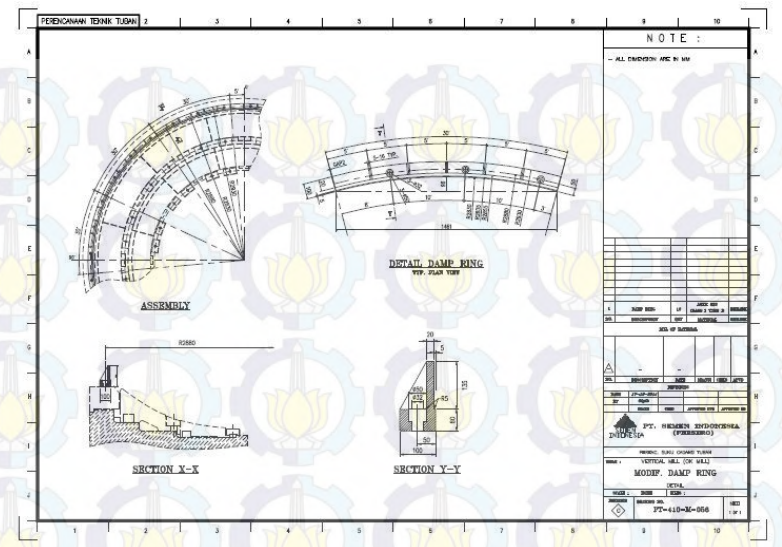
Run	FE%	C	Mg	P	S	Si	Sn	Al	Alsol.
1>	98.3578	0.34530	0.83824	0.01596	0.00631	0.20651	0.00065	0.01901	0.0161
2>	98.3483	0.34644	0.84035	0.01615	0.00667	0.20908	0.00083	0.01806	0.0160
3>	98.3687	0.34485	0.83052	0.01607	0.00665	0.20436	0.00084	0.01729	0.0151
Avg	98.3582	0.34553	0.83637	0.01606	0.00655	0.20665	0.00078	0.01812	0.0157
Std	0.0102	0.00082	0.00518	0.00010	0.00020	0.00237	0.00011	0.00037	0.0003
Std%	0.0104	0.23631	0.61916	0.61742	3.11452	1.14490	13.75703	4.77458	3.4469
Cr	Cu	Ni	Mn	V	Pb	Ca	Mo	Co	
1>	0.14453	0.00767	0.01093	0.00251	0.00158	-0.00296	-0.00003	0.00938	0.0
2>	0.14549	0.00758	0.01083	0.00280	0.00170	-0.00272	-0.00002	0.00975	0.0
3>	0.14349	0.00768	0.01064	0.00238	0.00143	-0.00319	-0.00003	0.00947	0.0
Avg	0.14450	0.00745	0.01080	0.00256	0.00157	-0.00296	-0.00003	0.00953	0.0
Std	0.00100	0.00033	0.00014	0.00022	0.00013	0.00023	0.00001	0.00019	0.0
Std%	0.69211	4.36914	1.33204	8.453237	8.56316	-7.91595	-21.18432	2.00439	10.5
B	W	N	Ti	Ta	F	CE	W		
1>	0.00137	0.00469	0.00507	0.02269	0.00073	0.847	0.517	73.231	
2>	0.00158	0.00527	0.00637	0.02321	0.00078	0.887	0.519	73.411	
3>	0.00142	0.00512	0.00691	0.02349	0.00011	0.875	0.515	73.037	
Avg	0.00146	0.00503	0.00645	0.02313	0.00054	0.870	0.517	73.226	
Std	0.00011	0.00030	0.00042	0.00041	0.00037	0.021	0.002	0.187	
Std%	7.44064	6.04129	6.55764	1.75549	68.60328	2.395	0.362	0.255	

P T SEMEN GRESIK PERSERO
531.030-199 OK cement grinding system

Category	Property	Value
Technical specification		
531.RP090	Air lock	
	Type	Rotary sluice - Heated
	Size	ø1600
	Rotor diameter	1600 mm
	Rotor width	1600 mm
	Number of vanes	6
Geared motor, helical gear	Mass flow rate, operating	390 t/h
	Power	11 kW
531.RM100 Grinding table	Roller mill	
	Table material	Ductile Iron/steel
	Table diameter (max. grinding surface)	5600 mm
	Table speed	22.2 1/min
	Table segment material	White cast iron (3831) / steel (2530)
	Hardness of table track	750 ± 40 HV
	Number of table liners	2x12
Nozzle ring	Weight of table liners	19692 kg
	Estimated weight	14300 kg
	Number of vanes	36 vanes (32 openings)
	Nozzle ring gas velocity	40-50 m/s
Grinding rollers	Wear protection	Hardfaced plate
	Number of rollers	4
	Roller diameter	2480 mm
	Roller width	1010 mm
	Inclination	15°
	Bearing housing material	Cast steel (2530)
	Roller segment material	White cast iron (3831)
	Hardness of roller tire	750 ± 40 HV
	Thickness of roller liners	320 mm
	Weight of roller liners, per roller	4808 kg
531.XA101	Roller bearing lubrication	Circulating oil
	Mill parts, plant specific	
531.HY110 Hydraulic cylinders and joint heads	Hydraulic system	
	Compression method	Tension cylinders and hydraulic accumulator/spring system
	Number of cylinders	4
	Specific grinding pressure	1050 kN/m²
531.GS115	Grease lubrication system	

531.HY128	Swing out device	
531.WI130	Water injection system	
	Commercial unit description	Water injection
	Air flow rate	5.0 m ³ /min
	Water flow rate	8 m ³ /h
	Pressure, air	5-7 bar
	Water pressure	3 bar
	Water temperature	35 °C
531.GR132	Grinding aid injection system	
Grinding aid injection system		
	Tank volume	3.5 m ³
Grinding aid injection		
	Pump rating	2 m ³ /h
	Grinding aid type	Diethylene glycol
531.MD140	Main drive	
Gear unit		
	Reducer type	Planetary
	Manufacturer	MAAG
	Speed, input	995 1/min
	Speed, output	33.3 1/min
	AGMA durability service factor	2.5
	AGMA strength service factor	1.5
	Motor power	5500 kW
531.GR150	Separator	
Design Data		
	Rotor diameter	6300 mm
	Rotor height	3780 mm
Separator		
	Type	ROKSH
	Size	99
Hard plate parts		
	Hardface material	Chromium carbide up
Bearing arrangement		
	Bearing type	Top: Spherical thrust roller, Bottom: Cylindrical roller
Bearing temperature measurement		
	Bearing temperature sensors	PT-100
531.MD152	Separator Main drive	
	Speed, rotor	73 1/min
	Power required	332 kW
	Speed, sp	24 m/s
	Transmission type	Bevel reducer, Flexible couplings and external oil supply unit
Coupling		
	Coupling type	Highly flexible with rubber elements
Gear		
	Reducer type	Right angle, helical gear
	Service factor, minimum	1.8
	Arrangement	Triple reduction
	Reducer lubrication	External oil cooler with fan
Coupling		
	Coupling type	Flexible with rubber elements
VFD motor system, separator		
	Power	335 kW
	Type	AC motor including converter
531.LG153	Separator gear lubrication	
	Type	Air to oil heat exchanger

531.GS155	Grease Lubrication Unit	
Grease Lubrication Unit:	Bearing lubrication	Automatic grease lubricator, flow and reservoir controlled, pump included



BIODATA PENULIS



Refki Despratama M, lahir di Jambi, 1 Desember 1991. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis lahir dari pasangan Kiking Mutakin, SE dan Neneng Maemunah SE. Penulis adalah lulusan SD Attaufiq periode 1997-2003, SMPN 1 Kota Jambi periode 2003-2006 dan SMAN 3 Kota Jambi periode 2006-2009.

Penulis merupakan alumni Teknik Mesin FTI-ITS (Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember) periode 2011-2016.

Penulis pernah menjadi bagian dari LSM Daku yang merupakan organisasi non profit bergerak dibidang pertumbuhan dan perkembangan remaja, melakukan kerja praktek di PT. Dirgantara Indonesia selama 1 bulan dan magang di PT Pembangkitan Jawa Bali Services mendapat bagian investigasi pada kegagalan *tube boiler* dari aspek metalurgi.

Penulis aktif di berbagai organisasi dan kepanitiaan, antara lain Mesin Music Club, Ketua reuni akbar SMPN 1 Kota Jambi, Koordinator Dana di Mechanical City dan menjadi bagian dari Divisi Event dari IEMC 2012.